

Belebungsbecken in Abwasserbehandlungsanlagen - In-Situ-Untersuchung des Betonangriffs und Folgerungen für die Bauwerksdichtigkeit

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

1997

Bericht erstattet von:

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dr.-Ing. F. Schmidt-Döhl
Dipl. Biotech. D. Velten
Dipl.-Ing. P. Onken
Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann

Gefördert mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	1
1. EINLEITUNG	2
2. CHARAKTERISIERUNG DES ABWASSERS IM HINBLICK AUF EINEN CHEMISCHEN ANGRIFF	3
3. BETONREZEPTUREN	6
4. FRISCH- UND FESTBETONKENNWERTE	10
5. PROBEKÖRPER	11
5.1 Stahlbetonprobekörper mit eingeprägten Rissen	11
5.2 Probewände und Beckenwände	18
6. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	19
6.1 Makroskopische Veränderungen der Proben	19
6.2 Veränderungen des Phasenbestandes	22
6.2.1 Dicke der nicht-alkalischen Randzone	22
6.2.2 Untersuchungen mittels Differentialthermoanalyse/-gravimetrie	22
6.2.3 Röntgenographische Untersuchungen	24
6.3 Untersuchungen der Porenradienverteilung	24
6.4 Bauwerksverfahren zur Prüfung des Wassersaugens und der Gaspermeabilität	31
6.4.1 Wassersaugen (ISAT-Verfahren)	31
6.4.2 Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht	38
6.5 Chemische Analysen	44
6.6 Untersuchung der Stahlbewehrung auf Korrosion	44

6.7	Mikrobiologische Untersuchungen	49
6.7.1	Charakterisierung des Abwassers	50
6.7.2	Untersuchung der Betonproben - Einleitung	52
6.7.3	Untersuchung der Betonproben - Keimzahlen	54
6.7.4	Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop	58
6.7.5	Weitere mikrobiologische Untersuchungen	62
7.	DISKUSSION	63
8.	LITERATUR	66

ZUSAMMENFASSUNG

In den Jahren 1989 und 1990 wurde die Abwasser-Vorbehandlungsanlage Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig stark erweitert. Durch den Ammoniumgehalt des Abwassers ist im Bereich der Belebungsbecken mit einem lösenden Angriff auf Beton zu rechnen. Die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit des neu eingebauten Betons B35 mit Zement HOZ 35 L-NW/HS/NA (CEM III/B 32,5-NW/HS/NA), $w/z = 0,45$, wurden langfristig untersucht. Die Ergebnisse stützen sich im wesentlichen auf die Untersuchung von Stahlbetonproben mit eingeprägten Trennrissen, die nach Beginn des routinemäßigen Betriebes in eines der neu erstellten Belebungsbecken eingehängt wurden. Zu Vergleichszwecken wurden entsprechende Betonkörper sowie zwei Probewände, die in ihren Abmessungen den Beckenwänden vergleichbar sind, atmosphärisch bewittert.

Die Probekörper wurden während des Beaufschlagungszeitraums von vier Jahren sechsmal aus dem Becken entnommen und auf folgende Parameter untersucht: Makroskopische Veränderungen, Veränderungen des Phasenbestandes, Porenradienverteilung, Wassersaugen und Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht. Weiterhin wurde der Beton auf Chlorid und Gesamtstickstoff analysiert und der Korrosionszustand der Bewehrung in Abhängigkeit von der Betondeckung und der Rißbreite untersucht. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig wurde außerdem die mikrobielle Besiedlung der Betonproben analysiert.

Anzeichen für einen chemischen Angriff konnten an den in der Wasserwechselzone eingelagerten Probekörpern nicht beobachtet werden. Die Untersuchung ergab, daß das Wassersaugen und die Gaspermeabilität des Beton bis zu einem Einlagerungszeitpunkt von ca. zwei Jahren abnahm und danach etwa konstant blieb. Auch die zeitabhängige Untersuchung der Porenradienverteilung zeigte einen dichter werdenden Beton ohne Anzeichen eines lösenden Angriffs. Eine Gefährdung für die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit des Betons war nicht zu erkennen. Die mikrobiologischen Untersuchungen des Betons ergaben eine starke Zunahme der Besiedlung mit fortschreitender Einlagerungsdauer. Sie konnte bis in mehrere Zentimeter Tiefe beobachtet werden. Säurebildende Thiobacillen und Nitrifikanten konnten nur in einer Oberflächenschicht (0-0,5 cm Tiefe) nachgewiesen werden (auch acidophile Thiobacillen). In einer leicht korrodierten Betonprobe aus der Wandkrone konnten keine Thiobacillen oder Nitrifikanten beobachtet werden. Die Untersuchungen zum Korrosionszustand der Bewehrung ergaben, daß bei einer für Kläranlagen empfohlenen zulässigen Rißbreite von 0,15 mm und einer Betondeckung $\min c = 4$ cm für starken chemischen Angriff nach DIN 4030 eine Korrosion sicher ausgeschlossen werden kann. Anzeichen dafür, daß diese Anforderungen an die Betondeckung und die Rißbreite zu hoch sind, ergaben sich nicht.

1. EINLEITUNG

In den Jahren 1989 und 1990 wurde die Abwasser-Vorbehandlungsanlage Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig durch vier neue Belebungsbecken, zwei Nachklärbecken und mehrere kleinere Betonbauwerke erweitert. Die bestehenden zwei Belebungsbecken der Anlage zeigten zu diesem Zeitpunkt stärkere Schäden. Diese bedeutende Erweiterung der Anlage wurde zum Anlaß genommen, die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit des neu eingebauten Betons über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu untersuchen.

Auf der Baustelle wurden Stahlbetonprobekörper mit verschiedener Betondeckung hergestellt, in die anschließend Risse mit verschiedener Rißbreite eingeprägt wurden. Nach dem Übergang in den routinemäßigen Betrieb der neuen Anlagenteile wurden diese Probekörper in das neue Belebungsbecken fünf eingehängt. Das Forschungsprojekt stützt sich im wesentlichen auf die Untersuchung dieser Probekörper. Als Referenzproben, an denen Vergleichsdaten zu dem beaufschlagten Beton in der Kläranlage gewonnen wurden, dienten einige Stahlbetonprobekörper die nicht eingelagert wurden sowie zwei Betonwände, die in ihren Abmessungen den Beckenwänden vergleichbar sind. Diese Probekörper wurden atmosphärisch bewittert.

Die Proben wurden auf makroskopisch sichtbare Veränderungen (chemischer Angriff) sowie auf Veränderungen des Phasenbestandes und der Porenradienverteilung untersucht. Das Wassersaugen und die Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht wurde mittels zweier zerstörungssarmer Bauwerksverfahren gemessen. Im Hinblick auf die Korrosionsgefährdung der Bewehrung wurde der Chlorid- und Gesamtstickstoffgehalt in verschiedenen Schichten der Proben analysiert und die Bewehrung im Bereich von Rissen freigelegt und untersucht. In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig (Prof. Hanert) wurde außerdem die mikrobielle Besiedlung des Betons, insbesondere im Hinblick auf säureproduzierende und damit betonangreifende Bakterien, analysiert.

Das Forschungsvorhaben wurde in den ersten 2 ½ Jahren aus Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen in dankenswerter Weise unterstützt. Aufgrund der notwendigen, langfristigen Beobachtung der Proben wurden die Arbeiten danach über einen Zeitraum von weiteren 3 Jahren mit eigenen Mitteln des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz weitergeführt.

2. CHARAKTERISIERUNG DES ABWASSERS IM HINBLICK AUF EINEN CHEMISCHEN ANGRIFF

Von der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig wurden zur Bestimmung des zu erwartenden Betonangriffs (ohne Berücksichtigung des Einflusses von Mikroorganismen) am 23.01.1989 in verschiedenen bestehenden Anlagenteilen Wasserproben entnommen und analysiert. Tab. 1 zeigt die gewonnenen Ergebnisse.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der Abwässer in der Abwasser-Vorbehandlungsanlage Steinhof. Probennahme am 23.01.1989 (n. - nachweisbar, n.n. nicht nachweisbar).

Entnahmestelle		Abwasserzu- laufpumpwerk	Belebungs- becken 1	Nachklär- becken 1
Geruch		Abwasser	Abwasser	Abwasser
Aussehen, Farbe		leicht trübe	gelblich trübe	leicht trübe
Art u. Farbe des Ungelösten		wenig, braun	sehr viel, braun- schwarz	wenig, hell
pH-Wert (elektrometrisch)		8,7	7,2	7,4
Kaliumpermanganatverbrauch	mg/l	147	373	503
Calcium	mg/l	144	68	64
Magnesium	mg/l	5,8	0,7	1,0
Chlorid	mg/l	193	103	96
Sulfat	mg/l	145	113	117
kalklösende Kohlensäure	mg/l	0,0	0,0	0,0
Eisen III	mg/l	n.n.	Spuren	n.n.
Sulfid	mg/l	Spuren	Spuren	Spuren
Nitrat	mg/l	n.	n.	n.
Gesamthärte	°dH	21,6	9,7	9,3
Scheinbare Carbonathärte	°dH	21,9	28,6	15,7

Die betonschädlichen Stoffe Magnesium und Sulfat liegen in unschädlichen Konzentrationen vor. Kalklösende Kohlensäure fehlt, der pH-Wert liegt im neutralen bis schwach alkalischen Bereich. Sulfide sind ebenfalls nur in Spuren vorhanden. Anders ist die Situation hinsichtlich des Ammoniums, das lösend auf Beton wirken kann. Tab. 2 zeigt die Ergebnisse einer detaillierten Ammonium- bzw. Stickstoffanalyse in verschiedenen, bestehenden Anlagenteilen vom 01.02.1989. Abb. 1 zeigt die Ammoniumkonzentration im Ablauf der Vor- bzw. Nachklärung während des Einlagerungszeitraums der Stahlbetonproben. Deutlich zu erkennen ist das „Anfahren“ des Ammoniumabbaus Anfang 1991. Die Einlagerung der Betonproben in das Belebungsbecken fünf begann mit dem Übergang in den routinemäßigen Betrieb im April/Mai 1991.

Tab. 2: Ammonium- bzw. Stickstoffkonzentrationen in verschiedenen Anlagenteilen der Abwasser-Vorbehandlungsanlage Steinhof. Probennahme am 01.02.1989.

	Ammonium (kein Aufschluß) in mg/l		Gesamt-Stickstoff nach Kjeldahl in mg/l	
	als N	als NH ₄	als N	als NH ₄
Abwasserdruckleitung im Zulauf zur Rechenanlage	59,6	76,8	70,4	90,7
Abwasserzulaufpumpwerk	60,1	77,4	77,0	99,2
Abwasserzulaufpumpwerk	61,1	78,7	72,0	92,7
Rücklaufschlammumpwerk	35,8	46,1	36,0	46,5
Einlauf Belebungsbecken	34,5	44,4	37,7	48,6
Belebungsbecken 1	35,4	45,6	39,0	50,3
Belebungsbecken 2	36,1	46,5	39,8	51,3
Verteilerbauwerk 1	34,7	44,7	40,0	51,5
Nachklärbecken 1	35,1	45,2	38,2	49,2
Nachklärbecken 2	34,2	44,1	38,2	49,1

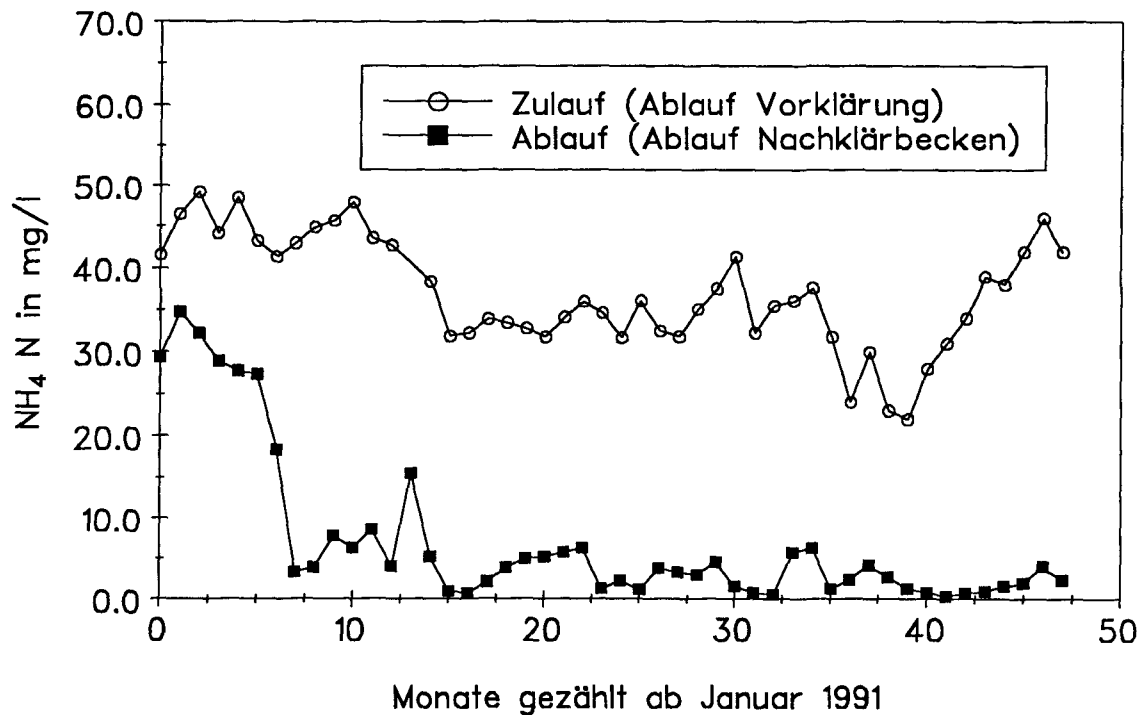


Abb. 1: Ammoniumkonzentration im Ablauf der Vor- bzw. Nachklärung im Untersuchungszeitraum nach Angaben des Kläranlagenbetreibers

Nach DIN 4030 /N5/ ist bei Ammoniumkonzentrationen zwischen 15 und 30 mg/l NH_4^+ von einem schwachen chemischen Angriff, bei Konzentrationen zwischen 30 und 60 mg/l von einem starken chemischen Angriff und bei Konzentrationen größer 60 mg/l von einem sehr starken chemischen Angriff auszugehen (15, 30 und 60 mg NH_4^+ entsprechen 11,6, 23,3 bzw. 46,6 mg/l NH_4^+ N). Diesen Angriffsgraden sind die Umweltklassen 5a, 5b und 5c (schwacher, mäßiger und starker chemischer Angriff) der DIN V ENV 206 /N2/ zuzuordnen. Die sich daraus ergebenden Betonzusammensetzungen und -eigenschaften sind entsprechend DIN 1045 /N3/ bzw. DIN V ENV 206 /N2/ festzulegen. Bei sehr starkem chemischen Angriff nach DIN 4030 bzw. Umweltklasse 5c nach DIN V ENV 206 muß der Beton zusätzlich "durch Beschichtungen vor direkter Berührung mit dem angreifenden Medium geschützt werden, ausgenommen in den Fällen, in denen ein derartiger Schutz nicht für erforderlich gehalten wird" /N2/. Man kann erkennen, daß die gemessenen Ammoniumkonzentrationen im Bereich der Belebungs- und Nachklärbecken den Grenzwert der DIN 4030 für sehr starken chemischen Angriff nur kurzfristig erreichen. Allerdings ist, insbesondere im Bereich des Zulaufs, mit einem starken Angriff zu rechnen.

3. BETONREZEPTUREN

Bei der Erweiterung der Abwasser-Vorbehandlungsanlage Steinhof wurde wasserundurchlässiger Beton für starken chemischen Angriff der Festigkeitsklasse B35 eingebaut. Zunächst wurde mit einem Wassorzementwert von 0,47, ab Februar 1990 mit einem w/z-Wert von 0,45 gearbeitet. In der Regel wurde Zuschlag der Sieblinie A/B 32, bei enger Bewehrung A/B 16 benutzt. Die Daten der verwendeten Betonrezepturen sind in Tab. 3 wiedergegeben. Die Konsistenz KR wurde unter Verwendung von Verflüssiger bzw. Fließmittel eingestellt. Alle für dieses Forschungsprojekt verwendeten Probekörper wurden auf der Baustelle mit dem jeweils dort eingebrachten Beton hergestellt, unter Praxisbedingungen verdichtet und nachbehandelt.

Tab. 3a: Während der Betonarbeiten verwendete Rezepturen (Fortsetzung: Tab 3b).

Betonsorte	61433.1	61423.1	62433.1
Verwendung	allgemein bis Januar 1990 etwa Probestand I	Sohlplatten bis Januar 1990	enge Bewehrung
Konsistenz	KR	KP	KR
angestrebte Festigkeitsklasse	B35	B35	B35
Zementart	HOZ 35 L NW HS NA	HOZ 35 L NW HS NA	HOZ 35 L NW HS NA
Zementgehalt in kg/m ³	370	360	390
Wasser kg/m ³	174	170	185
w/z-Wert/Wasserbindemittelwert	0,47	0,47	0,47
Zuschlag	A/B 32	A/B 32	A/B 16
Zuschlag in kg/m ³	1808	1830	1765
0/2 in %	38	38	37
2/8 in %	6	6	18
8/16 in %	26	26	45
16/32 in %	30	30	
Zusatzmittel	Woermann BV 25	Woermann BV 25	Woermann BV 25
Zusatzmittelgehalt	0,5 % v. Z.	0,6 % v.Z.	0,5 % v.Z.

Tab. 3b: Während der Betonarbeiten verwendete Rezepturen.

Betonsorte	61433.2	61423.2	62433.2	
Verwendung	allgemein ab Februar 1990 Proben mit eingepprägten Rissen	Sohlplatten ab Februar 1990	enge Beweh- rung	Beton mit Flugasche etwa Probe- wand 2
Konsistenz	KR	KP	KR	KR
angestrebte Festigkeitsklasse	B35	B35	B35	B35
Zementart	HOZ 35 L NW HS NA	HOZ 35 L NW HS NA	HOZ 35 L NW HS NA	HOZ 35 L NW HS NA
Zementgehalt in kg/m ³	380	360	390	330
Wasser kg/m ³	171	162	176	162
w/z-Wert/Wasser- bindemittelwert	0,45	0,45	0,45	0,47
Zusatzstoff				Flugasche
Gehalt in kg/m ³				50
Zuschlag	A/C 32	k.A.	k.A.	A/B 32
Zuschlag in kg/m ³	1816	1839	1776	1817
0/2 in %	38	38	37	30
2/8 in %	6	6	18	12
8/16 in %	26	26	45	29
16/32 in %	30	30		29
Zusatzmittel 1	Woermann BV 25	Woermann BV 25	Woermann BV25	Woermann BV 14
Gehalt	0,5 % v. Z	0,5 % v.Z.	0,5 v.Z.	0,6 % v.Z.
Zusatzmittel 2	Woermann FM 26	Woermann FM 26	Woermann FM 26	Woermann FM 26
Gehalt	0,4 % v.Z.	0,5 % v.Z.	0,5 % v.Z.	k.A..

Auswahl des Zementes

Betone aus Hochofenzement zeigen in Relation mit Betonen aus anderen Zementen eine vergleichsweise hohe Dichtigkeit und damit verbunden auch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen verschiedene chemische Stoffe (abgesehen von der Carbonatisierung). Sie besitzen bei ausreichender Nachbehandlung eine sehr feine Porenstruktur, zeigen gegenüber Betonen aus Portlandzement eine verstärkte Sorption negativer Ionen an den Porenwänden aufgrund einer SiO_2 reicheren C-S-H-Phase und eine verlangsamte Gegendiffusion von OH^- -Ionen aufgrund der niedrigeren OH^- Konzentration in der Porenlösung.

Weiterhin ist bekannt, daß der Chloriddiffusionswiderstand von Hochofenzementbetonen mit großem Hüttensandgehalt wesentlich größer ist als der reiner Portlandzementbetone, ebenso der elektrolytische Widerstand, der für den Korrosionswiderstand der Bewehrung ebenfalls von großer Bedeutung ist [4,6,11,18]. Für den Chloriddiffusionswiderstand ist die Adsorption der negativen Chloridionen an den Porenwänden von großer Bedeutung. Sie führt zum Abbau der Konzentrationsgradienten und damit zur Verlangsamung der Diffusion.

Im Falle lösenden Angriffs muß die festigkeitsbildende Struktur des Bindemittels, die C-S-H-Phase, zerstört werden. Austauschfähige Salze wirken auf alle calciumhaltigen Komponenten des Bindemittels ein, sicher zuerst auf das Calciumhydroxid, dann auch auf die C-S-H-Phase. Nach Biczok [3] werden Traß- und Hochofenzementbetone teilweise schneller durch austauschfähige Salze angegriffen als Portlandzementbetone. Er erklärt dies über die schnellere hydrolytische Zersetzung der C-S-H-Phase aufgrund der geringeren Pufferwirkung durch die geringere Calciumhydroxidkonzentration. In der Betonporenlösung ist Calciumhydroxid normalerweise nur schwer löslich. Durch von außen eindringende saure Lösungen oder austauschfähige Salze kann die gelöste Menge stark ansteigen, ohne daß dadurch sofort die C-S-H-Phase zerstört wird. In einem solchen Fall wird der Porenraum stark vergrößert, so daß Transportprozesse schneller voranschreiten können. Daher kann eine größere Calciumhydroxidkonzentration in einem Beton bei lösendem Angriff auch nachteilig sein. Diese Vergrößerung des Porenraumes wird sich bei solchen Betonen am stärksten bemerkbar machen, die sehr dicht sind. Bei relativ durchlässigen Betonen spielt die Vergrößerung des Porenraumes durch den lösenden Angriff keine große Rolle für die Transportgeschwindigkeit der Schadstoffe.

Diese beiden Eigenschaften des Calciumhydroxids im Falle eines lösenden Angriffs - Wirkung als alkalischer Puffer, aber auch schnelle Vergrößerung des Porenraums durch die große Menge schnell weggelösten Materials - wirken entgegengesetzt. Welcher Prozess im konkreten Fall die Eigenschaften eines Betons bei einem lösenden Angriff bestimmt ist schwer vorherzusagen. In eigenen Versuchen zum lösenden Angriff durch Ammoniumlösungen konnte kein signifikanter Unterschied in den Abtragungsraten verschiedener Betone mit einem Wasserzementwert von 0,47, hergestellt aus hochgeschlacktem Hochofenzement bzw. Portlandzement und verschiedenen

Zusatzstoffen, festgestellt werden /20,21/. Zumindest korrodieren dichte Betone aus Hochofenzement im Falle lösenden Angriffs nicht wesentlich schneller als vergleichbare Betone aus Portlandzement.

Für flüssigkeitsdichte Behälter spielt die Bildung von Temperaturrissen durch Zwangsspannungen im jungen Betonalter eine große Rolle. Diese Risse haben aufgrund des beschleunigten Eindringens von Schadstoffen und der möglichen Freilegung von Bewehrung auch eine große Bedeutung für die Dauerhaftigkeit eines Betonbauwerkes. Die Gefahr solcher Risse kann durch die Verwendung eines langsam erhärtenden Zements niedriger Hydratationswärme vermindert werden. Diese Zemente sind in der Regel Hochofenzemente, nur in Süddeutschland werden entsprechende Portlandzemente hergestellt. Aus diesen Gründen wurde ein Hochofenzement HOZ 35 L-NW/HS/NA (CEM III/B 32,5-NW/HS/NA) eingesetzt.

4. FRISCH- UND FESTBETONKENNWERTE

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Frisch- bzw. Festbetonprüfungen an den für dieses Forschungsprojekt verwendeten Betonen.

Tab. 4: Frisch- und Festbetonprüfungen der am 7.3.90, 28.3.90 und 16.5.90 hergestellten Stahlbetonproben mit eingeprägten Trennrissen sowie Daten zu den Probewänden I und II.

Herstellungsdatum	7.3.1990	28.3.1990	16.5.1990
Rezeptur	61433.2	61433.2	61433.2
Ausbreitmaß in cm	47	46 45	41 42
Rohdichte in kg/dm ³	2,55 2,51	2,42	
Temperatur Luft °C	3	9	15,9
Temperatur Beton °C	10	10	18,7
Würfeldruckfestigkeit in N/mm ² (28 Tage)	41 45 42	52 52 52	46 48 45
Mittel	43	52	46
Wassereindringtiefe in cm nach DIN 1048	1,3 1,1 1,2	1,1 1,1 1,5	1,3 0,8 0,9
Mittel	1,2	1,2	1,0
Prüfalter in Tagen	65	33	33
Probewand	I	II	
Rezeptur/Verwendung	61433.1	Beton mit Flugasche	
Alter in Tagen	28 56	33	
Würfeldruckfestigkeit in N/mm ²	38 46		
Wassereindringtiefe in cm nach DIN 1048	1,8	3,6	

5. PROBEKÖRPER

5.1 Stahlbetonprobekörper mit eingepprägten Rissen

Es wurden insgesamt 32 Probekörper aus Stahlbeton hergestellt. Die Betonrezeptur und die Frisch- und Festbetonkennwerte wurden in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben. Je 16 Proben wurden in den Abmessungen 20x20x50 cm bzw. 32x20x50 cm erstellt. Die kleineren Proben besitzen eine Betondeckung von zwei cm, die größeren fünf cm. Die Bewehrungsführung der beiden Probenarten ist in Abb. 2 dargestellt. Je vier Probekörper beider Abmessungen wurden am 9.2.90, am 7.3.90, am 28.3.90 und am 16.5.90 hergestellt. Sie wurden auf der Baustelle in leicht saugender Holzschalung betoniert, mit einer Rüttelflasche verdichtet und zwischen fünf und sieben Tagen mit Folie abgedeckt in Schalung belassen. Danach wurden die Probekörper zum Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig verbracht.

In die Mitte der Proben wurde ein Edelstahl-Vierkantrohr, WN 1.4571 bzw. 1.4401 einbetoniert, in das nach Abschluß der Nachbehandlung 2 Keile, ebenfalls aus Edelstahl, WN 1.4301 eingesetzt wurden. Mit Hilfe dieser Keile wurden in einer Prüfmaschine direkt im Anschluß an die Nachbehandlung Trennrisse in die Proben eingepragt. Die eine Hälfte der Proben sollte mit maximalen Rißbreiten von 0,1 - 0,2 mm, die andere Hälfte mit Rißbreiten von 0,5 - 0,6 mm versehen werden. Dies konnte nicht ganz erreicht werden. Die Spannweiten der tatsächlichen maximalen Rißöffnungen der für die Versuche verwendeten Proben sind in Tab. 5 aufgelistet. Die Proben mit kleiner Rißbreite zeigten eine durchschnittliche maximale Rißöffnung von 0,22 mm. Die Spannweite reicht von 0,15 bis 0,3 mm. Die Proben mit großer Rißbreite zeigten eine durchschnittliche maximale Rißöffnung von 0,65 mm. Die Spannweite reichte von 0,4 mm bis zu 1,0 mm. Daneben sind immer auch Riße mit kleinerer Öffnung vorhanden. Abb. 3 zeigt eine Schemazeichnung eines Probekörpers mit kleiner Betondeckung und typischem Rißbild. Die Proben wurden mit ihrem Betonedatum und einer fortlaufenden Nummer gekennzeichnet.

POS. ① : 4 $\phi 10$ pro Probekörper

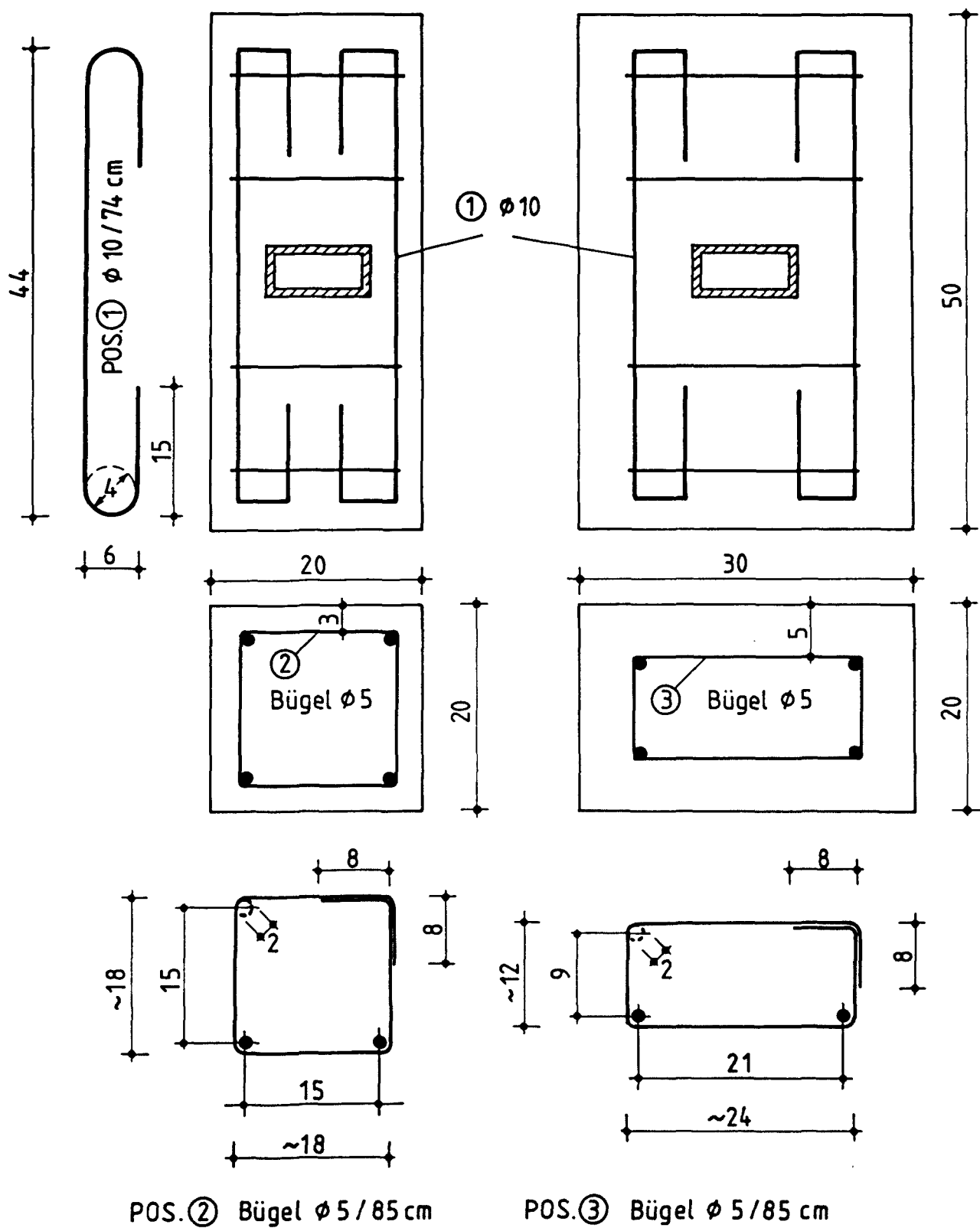


Abb. 2: Bewehrungsplan der Stahlbetonkörper mit Vierkantrohren zur Einprägung von Trennrissen.

Tab. 5: Rißbreiten und Positionen der Stahlbetonbetonproben mit eingepprägten Trennrissen im Belebungsbecken 5.

Betonüberdeckung in cm		2	5	2	5
Rißbreite		klein	klein	groß	groß
Probenposition im Belebungsbecken (s. Abb. 4)					
1	Probenbezeichnung	7.3.90-1	9.2.90-6	9.2.90-2	7.3.90-7
	max. Rißbreite in mm	0,05-0,25	0,1-0,25	0,05-0,4	0,05-1,0
2	Probenbezeichnung	16.5.90-5	28.3.90-1	28.3.90-5	16.5.90-6
	max. Rißbreite in mm	0,05-0,15	0,05-0,2	0,05-0,55	0,1-0,7
3	Probenbezeichnung	28.3.90-3	28.3.90-4	28.3.90-6	28.3.90-2
	max. Rißbreite in mm	0,05-0,15	0,05-0,2	0,05-0,45	0,2-0,6
4	Probenbezeichnung	16.5.90-3	16.5.90-7	16.5.90-8	16.5.90-2
	max. Rißbreite in mm	0,05-0,2	0,05-0,25	0,1-0,7	0,1-0,6
5	Probenbezeichnung	28.3.90-8	7.3.90-3	7.3.90-5	28.3.90-7
	max. Rißbreite in mm	0,05-0,2	0,05-0,2	0,05-1,0	0,2-0,6
6	Probenbezeichnung	9.2.90-1	9.2.90-8	9.2.90-4	9.2.90-5
	max. Rißbreite in mm	0,1-0,3	0,05-0,3	0,05-0,6	0,05-0,6

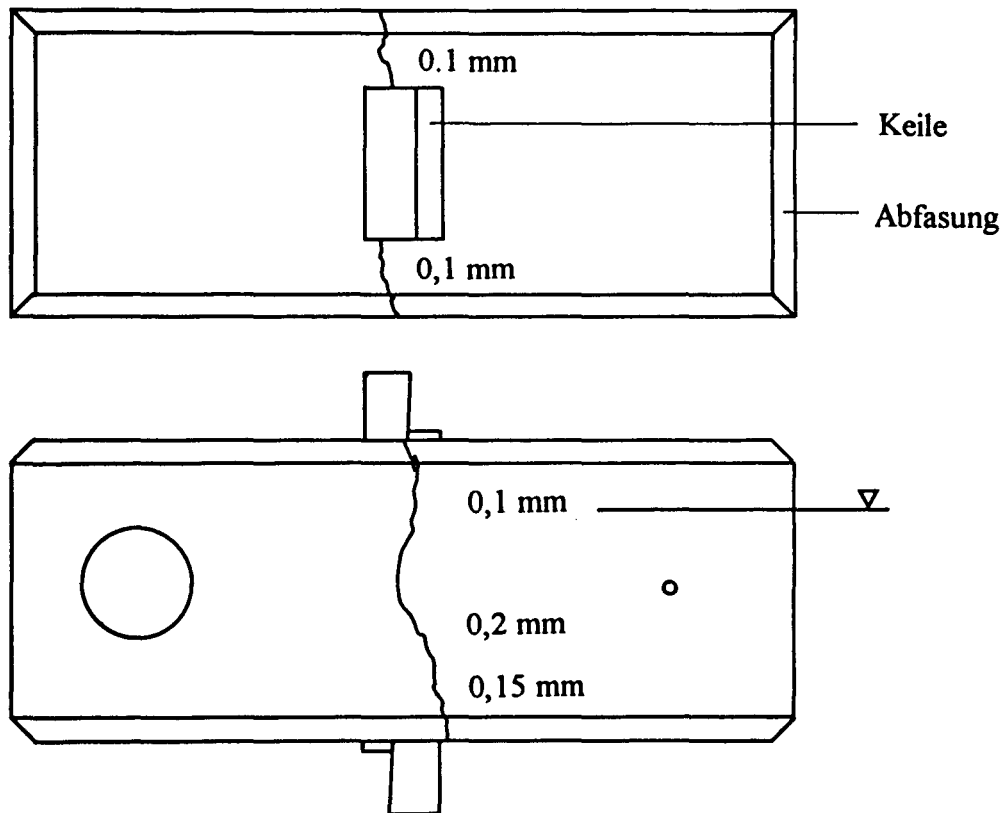


Abb.3: Probekörper mit 2 cm Betondeckung und typischem Rißverlauf. Eingezeichnet sind auch die Prüfstellen für das ISAT-Verfahren (links) sowie zur Messung der Gaspermeabilität (rechts, s. Kap. 6.4). Maße der Probe: 50 x 20 x 20 cm.

Die neuen Belebungsbecken der Kläranlage Steinhof wurden im November 1990 befüllt. Nach dem Übergang in den routinemäßigen Betrieb wurden insgesamt 24 der hergestellten Probekörper in das Belebungsbecken fünf eingehängt. Abb. 4 zeigt eine Schemaskizze der Belebungsbecken fünf und sechs mit den eingezeichneten Probenpositionen. Die übrigen Probekörper wurden als Referenzproben auf dem Gelände des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz atmosphärisch bewittert.

Der Rotor a ist normalerweise außer Betrieb, hier ist das Sauerstoffangebot im Becken am geringsten. Hinter diesem Rotor liegt die Probenposition 1. Zunächst war geplant, die Rotoren d und f ständig in Betrieb zu halten. Die Rotoren b, c und e sollten bei Bedarf zugeschaltet werden. Dieses Konzept wurde jedoch nicht aufrechterhalten. Die entsprechenden Probenpositionen 2 - 6 können also nicht nach verschiedenen Sauerstoffgehalten differenziert werden. Alle diese Proben-

positionen zeigen jedoch einen wesentlich größeren Sauerstoffgehalt im Abwasser als die Probenposition 1.

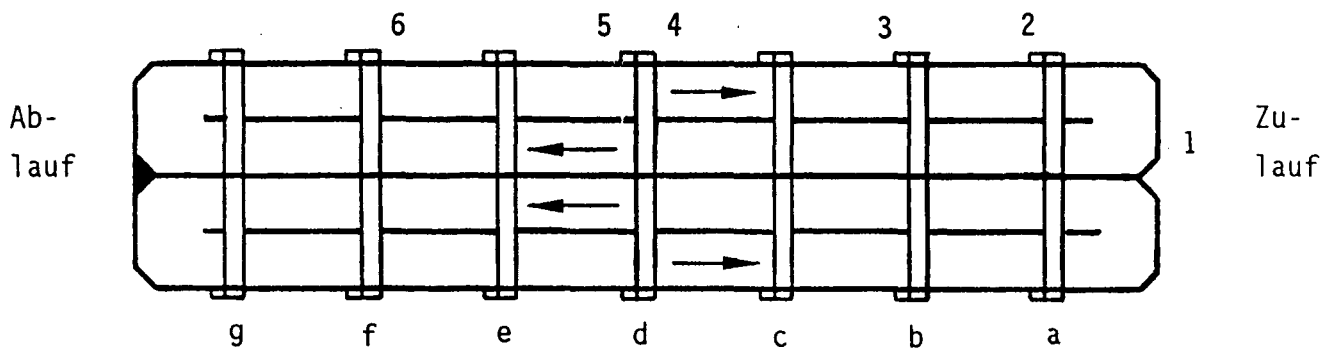


Abb. 4: Skizze der Belebungsbecken fünf und sechs der Kläranlage Steinhof. Eingezeichnet sind die Rotoren (Buchstaben) sowie die Lage der Probenpositionen (Nummern) in Becken fünf.

An jeder Probenposition wurden vier Proben eingelagert. Die Zuordnung der Proben zu den einzelnen Probenpositionen sowie ihre Betondeckung und Rißbreiten können aus Tab. 5 entnommen werden. Die Proben wurden in der Lage eingebaut, in der sie betoniert wurden, also mit der während der Betonage freien Oberfläche nach oben. Die Körper wurden mit Hilfe zweier Kunststoffseile so tief in die Becken heruntergelassen, daß sie zu etwa $3/4$ mit Wasser bedeckt waren. Diese Einlagerungsart wurde gewählt da in der Wasserwechselzone oft die größten Schäden an den Betonbauwerken entstehen. Aufgrund von Veränderungen des Wasserstandes wurden die Proben jedoch zeitweilig auch tiefer eingetaucht. Die Seile wurden auf die Außenseite der Becken geführt und dort mit Klemmen, Edelstahl-Ringschrauben und Schwerlastdübeln befestigt. Abb. 5 zeigt eine Schemaskizze der eingelagerten Proben. Die Abb. 7 und 8 in Kap. 6.1 zeigen typische Bilder der eingelagerten Stahlbetonprobekörper.

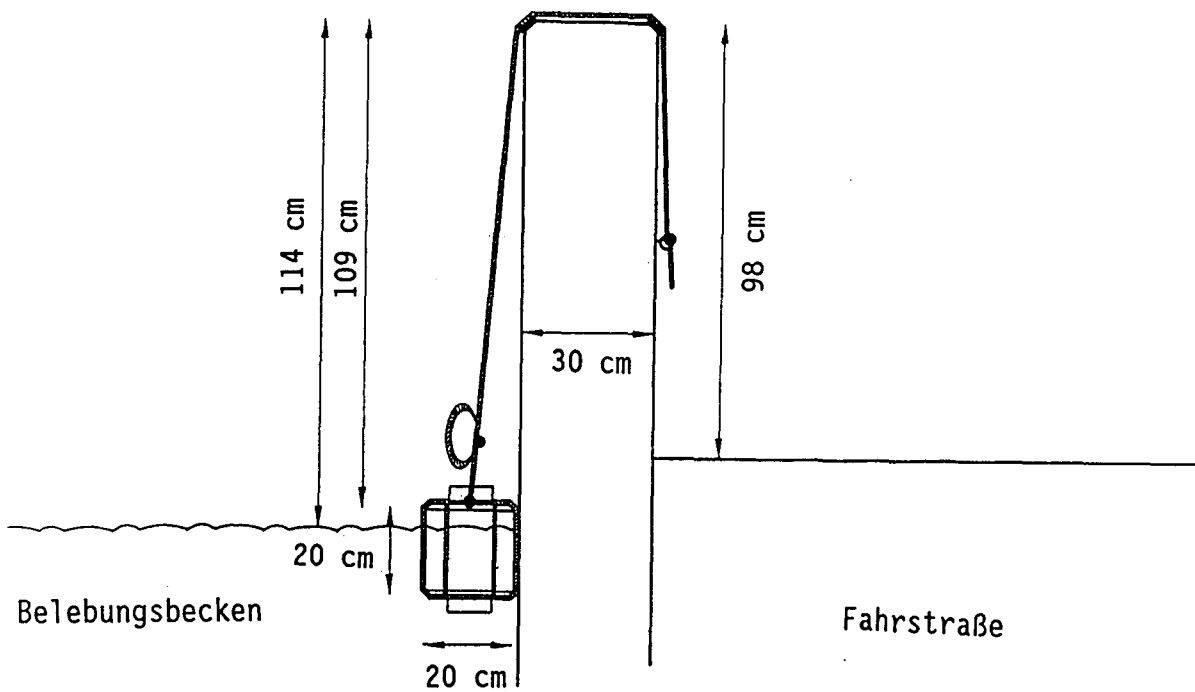


Abb. 5: Schemazeichnung der eingehängten Stahlbetonproben (20x20 cm) mit eingepprägten Trennrissen.

Die Zeitpunkte der Probenuntersuchungen und die Einlagerungszeiträume können aus der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tab. 6: Zeitpunkte der Probenuntersuchungen und Einlagerungszeiträume.

	Datum	Einlagerungszeitraum
Einlagerung	3./4.4.1991 Pos 1: 5.5.1991	
Herausnahme der kleinen Proben	16./19.8.1991	ca. 4 Monate
Herausnahme der kleinen Proben	26.2.1992	ca. 10 Monate
Herausnahme aller Proben	9./10.9.1992	ca. 17 Monate
Herausnahme der kleinen Proben	8.9.1993	ca. 25 Monate
Herausnahme der kleinen Proben	12.9.1994	ca. 37 Monate
Herausnahme aller Proben	11.7.1995	ca. 47 Monate

Tabelle 7 zeigt die jeweils durchgeführten Untersuchungen an den Proben.

Tab. 7: Arbeiten/Untersuchungen zu den jeweiligen Einlagerungszeitpunkten

Einlagerungszeitraum in Monaten ca.	Bohrkernentnahme	Makroskop. Untersuchung.	Phasenanalytik	Porenverteilung	Wassersaugen	Gaspermeabilität	Chemische Untersuchung	Korrosion der Bewehrung	Mikrobielle Besiedlung
4	ungerissener Bereich	X	X	X	X	X			
10	ungerissener Bereich	X			X	X			
17	Rißbereich + Kerne für mikrobiologische Untersuch.	X	X	X	X	X	X	X	X
25	nein	X			X	X			
37	nein	X			X				
47	Rißbereich + Kerne für mikrobiologische Untersuch.	X	X	X	X	X		X	X

Zur Untersuchung wurden die Proben aus dem Belebungsbecken herausgezogen und zunächst mit einem Wasserstrahl gereinigt. Abb. 6 zeigt einige der zur Untersuchung aus dem Becken entnommene Proben im August 1991. Im Falle einer Bohrkernentnahme wurden diese i.d.R. aus den langen Seitenwänden der Proben, einige Zentimeter vom Probenrand entfernt, entnommen. Nach 4- bzw. 10-monatiger Einlagerungsdauer wurde in ungerissene Bereiche ohne Bewehrung gebohrt, nach 17- bzw. 47-monatiger Einlagerungsdauer wurde in Bereiche gebohrt, die sowohl Risse mit maximaler Breite, als auch Bewehrung enthielten. Die Kerne mit einem Durchmesser von 5 cm wurden in Kunststoffolie aufbewahrt, um eine Austrocknung zu vermeiden. Die Bohrkern, die nach 4- bzw. 10-monatiger Einlagerungsdauer entnommen wurden, wurden zunächst in einer Prüfmaschine gespalten um frische Bruchflächen zu erzeugen. Die später entnommenen Kerne wurden mit Hilfe von Hammer und Meißel zerlegt um die Bewehrung freizulegen. Alle

weiteren Laboruntersuchungen wurden an diesen Bohrkernen durchgeführt. Für die mikrobiologischen Untersuchungen wurden zusätzliche Kerne erbohrt. Diese Kerne wurden jeweils direkt nach der Entnahme der entsprechenden Proben aus dem Belebungsbecken entnommen, verpackt und möglichst schnell weiter verarbeitet (s. Kap. 6.7). An den Probekörpern selbst wurde die Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht und die Wasseraufnahme mit dem ISAT-Verfahren gemessen. Nach Verschließen der Bohrlöcher mit einem Reparaturmörtel wurden die Proben wieder in das Becken eingehängt.

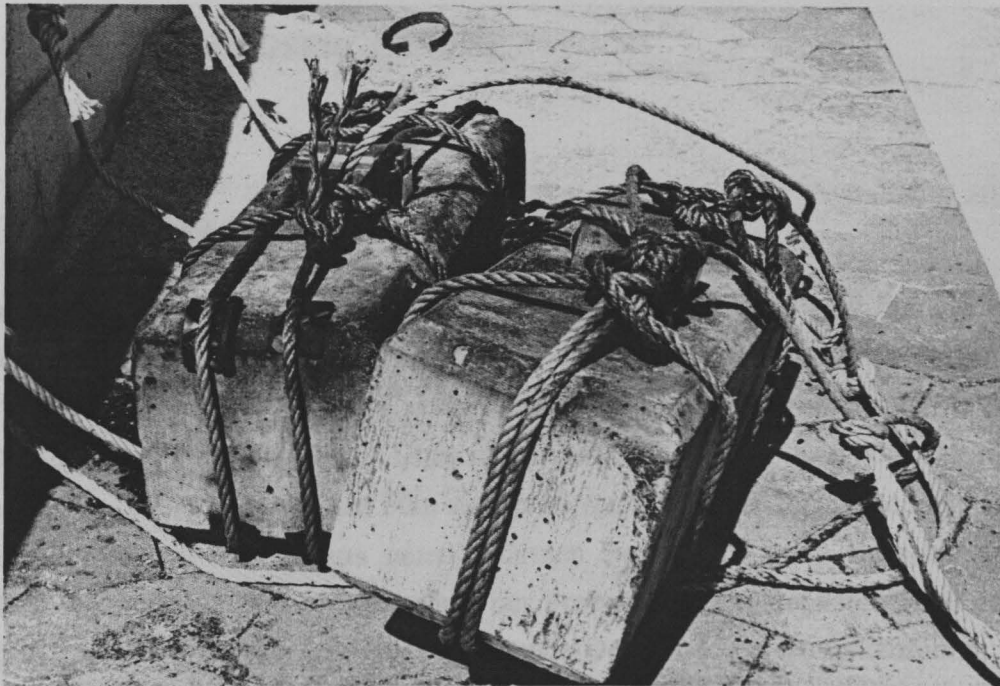


Abb. 6: Zur Untersuchung aus dem Becken entnommene, gesäuberte Proben.

5.2 Probewände und Beckenwände

Auf dem Baustellengelände wurden am 25.5.89 (Wand I) und am 31.5.89 (Wand II) zwei Probewände erstellt. Die Betonrezepturen dieser Wände können aus Tab. 3 entnommen werden. Angaben zur Druckfestigkeit und zur Wassereindringtiefe der Wände sind in Tab. 4 zusammengefaßt. Die flugaschehaltige Rezeptur der Wand II stellte sich bezüglich der Wassereindringtiefe als ungünstiger heraus. Die Wände haben eine Höhe von 3,50 m, eine Breite von 2,30 m und eine Dicke von 0,3 m. Sie wurden 5 Tage in Schalung belassen. Die Betondeckung beträgt 5 cm.

Die Wandflächen wurden Nord/Süd orientiert. Nach Beendigung der Bautätigkeiten an der Kläranlage wurden die beiden Wände ebenfalls Nord/Süd orientiert und atmosphärisch bewittert auf dem Gelände des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz aufgestellt. Ihr kapillares Wassersaugen sowie ihre Gaspermeabilität, Porenradienverteilung und Phasenzusammensetzung wurden zu Vergleichszwecken herangezogen. Sie werden weiterhin langfristig beobachtet.

Die Beckenwände der neu errichteten Belebungsbecken 3-6 wurden von der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig auf ihre Druckfestigkeit, ihre Gaspermeabilität und ihr kapillares Wassersaugen untersucht. Die entsprechenden Daten sind in den Berichten Nr. 1112/53 0 und 1295/163 9 dokumentiert.

6. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

6.1 Makroskopische Veränderungen der Proben

Die Abb. 7 und 8 zeigen einige typische Bilder von eingehängten bzw. gerade aus dem Belebungsbecken entnommenen Probekörpern. Auf den Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen bildete sich ein schleimiger Bewuchs, insbesondere bei Einlagerung in sauerstoffreiche Bereiche. Im Rahmen der mikrobiologischen Untersuchungen /23,24/ (s.a. Kap. 6.7) konnte festgestellt werden, daß es sich dabei um einen Film aus aerob wachsenden Stäbchen handelt. Bei vielen Proben, insbesondere bei solchen aus sauerstoffarmen Bereichen konnte eine schwarze Verfärbung beobachtet werden, die nach der Entnahme der Proben aus dem Becken schnell verblaßte (siehe Abb. 8). Diese Verfärbung ist auf anaerob lebende Desulfurizierer zurückzuführen. Diese produzieren Sulfid, das sich auf der Oberfläche ablagert.

Die Oberfläche der Betonproben wurde einerseits mit bloßem Auge und andererseits mittels der ausgebohrten Kerne mikroskopisch untersucht. Anzeichen für einen chemischen Angriff, wie z.B. das Zurücktreten des Bindemittels gegenüber den Zuschlägen (Herauslösen des Zementsteins) oder Rißbildungen, konnten nicht beobachtet werden.

Zwar traten abgebrochene Kanten und Rißflanken auf. Jedoch deutet sowohl das übrige makroskopische Erscheinungsbild der Proben als auch die durchgeführten Laboruntersuchungen darauf hin, daß es sich hierbei um rein mechanische Einwirkungen handelt, z.B. durch das Herausziehen der Proben aus dem Becken. Die Proben wurden an den Tragseilen aus den Becken gezogen, was mit erheblichen Belastungen für die Kanten der Probekörper verbunden war.



Abb. 7: Sauerstoffreiche Zone. Oben: eingehängter Probekörper bedeckt mit Belebtschlamm. Unten: entnommener Probekörper, bereits mit Wasser gereinigt, jedoch noch immer bedeckt mit Schleimschicht, z.T. mit dunklen Bereichen (aus /24/).

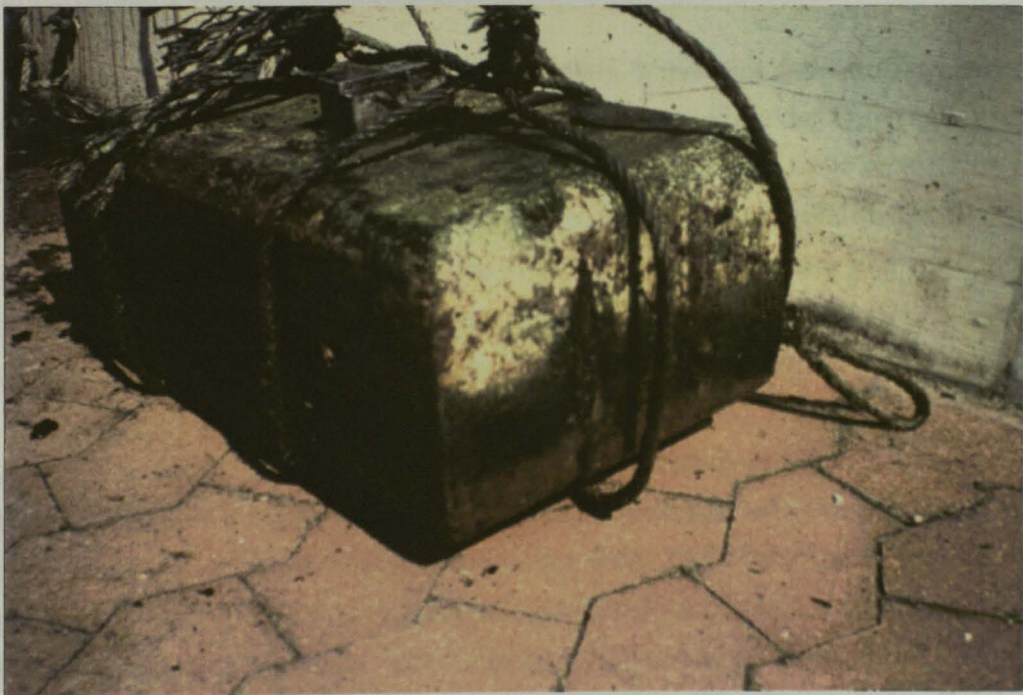


Abb. 8: Sauerstoffarme Zone. Oben: eingehängte Probekörper mit Pflanzenbewuchs. Unten: entnommener Probekörper, bereits mit Wasser gereinigt. Deutliche dunkle Verfärbung unterhalb der Wasserlinie (aus /24/).

6.2 Veränderungen des Phasenbestandes

6.2.1 Dicke der nicht-alkalischen Randzone

Durch die Carbonatisierung von Stahlbeton oder einen chemischen Angriff kann die Alkalität des Betons abgebaut werden. Die Dicke der nicht-alkalischen Randzone der Stahlbetonprobekörper mit eingepprägten Trennrissen wurde nach 47-monatiger Einlagerungszeit mit dem Phenolphthaleintest untersucht. Im Falle der in dem Belebungsbecken eingehängten Proben konnten Dicken der nicht-alkalischen Randzone zwischen 2 und 6 mm beobachtet werden. Sie sind auf die Carbonatisierung vor der Einlagerung in das Abwasser zurückzuführen (s.a. Kap. 6.2.2). Die atmosphärisch bewitterten Referenzkörper zeigten aufgrund der nicht ständigen Durchfeuchtung größere Carbonatisierungstiefen zwischen 7 und 10 mm. An den Probewänden I und II konnten folgende Carbonatisierungstiefen gemessen werden: Nordseite: Wand I (750 Tage) 2,8 mm, Wand II (825 Tage) 2,3 mm, Südseite: Wand I (750 Tage) 3,4 mm, Wand II (825 Tage) 3,4 mm.

6.2.2 Untersuchungen mittels Differentialthermoanalyse/-gravimetrie

Jeweils ein Probekörper aus der sauerstoffreichen Position 5, aus der sauerstoffarmen Position 1 und ein an freier Witterung gelagerten Referenzkörper wurde mit Hilfe der Differentialthermoanalyse/-gravimetrie (DTA/TG) auf Veränderungen des Phasenbestandes untersucht. Die Analysen wurden nach 17-monatiger und 47-monatiger Einlagerungsdauer durchgeführt. Dazu wurden aus Bohrkernen Pulverproben aus 0-1 cm Tiefe und 5-6 cm Tiefe entnommen und mit einem Gerät STA 409 der Firma Netzsch untersucht. Es wurde keine Anreicherung des Bindemittels vorgenommen. Abb. 9 zeigt die DTG Diagramme der 17 Monate beaufschlagten Proben. Deutlich erkennbar ist die Calciumhydroxidzersetzung zwischen 450 und 500°C. Der Calciumhydroxidgehalt aller Betone ist relativ klein. Dies ist bei Verwendung eines Zementes HOZ-HS zu erwarten. Signifikante Unterschiede im Calciumhydroxidgehalt der Proben sind nicht zu erkennen, weder bei Proben aus 0-1 cm Tiefe, noch bei Proben aus 5-6 cm Tiefe. Die "Delle" zwischen 280 und 450 °C im Falle der Probe 9-2-90/6 aus 5-6 cm Tiefe ist darauf zurückzuführen, daß ein Abstandshalter aus Kunststoff angebohrt wurde. Die Zersetzungsreaktion des Kunststoffes macht sich in diesem Fall bemerkbar. Dieser Peak führt zu einer teilweisen Überdeckung des Calciumhydroxidpeaks. Anzeichen für Phasenneubildungen oder andere korrosive Effekte sind nicht zu erkennen. Die 47 Monate eingelagerten Proben ergaben ähnliche Ergebnisse. Die Referenzprobe zeigte eine stärkere Carbonatisierung als die beaufschlagten Proben. Dies steht in Übereinstimmung mit den gemessenen Dicken der nicht-alkalischen Randzone.

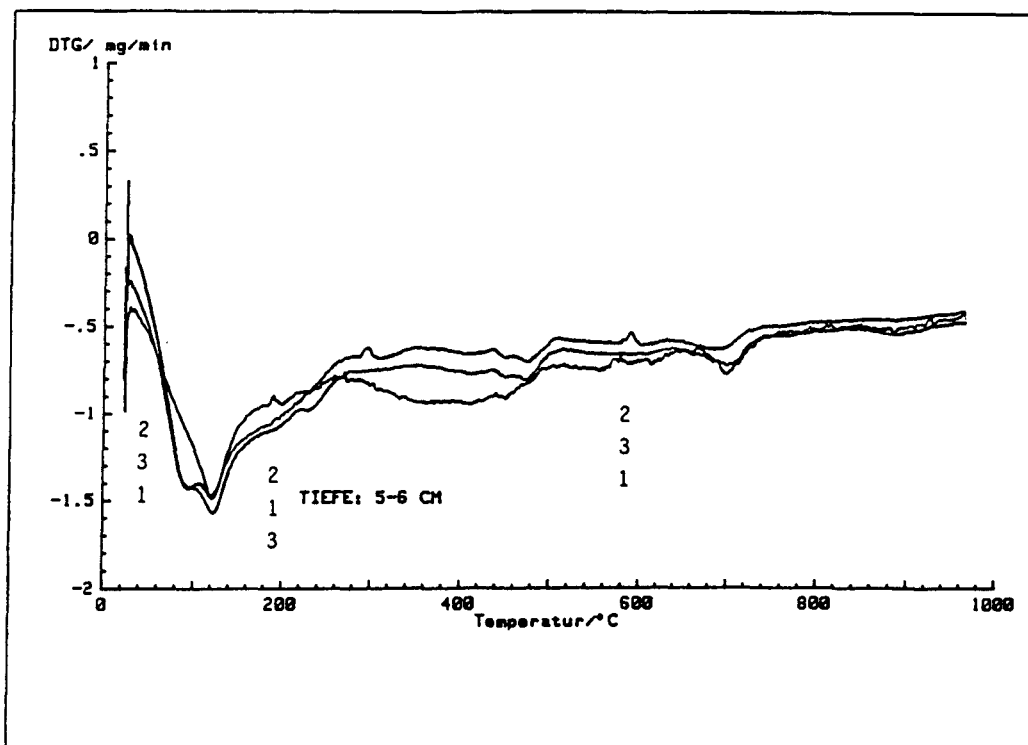
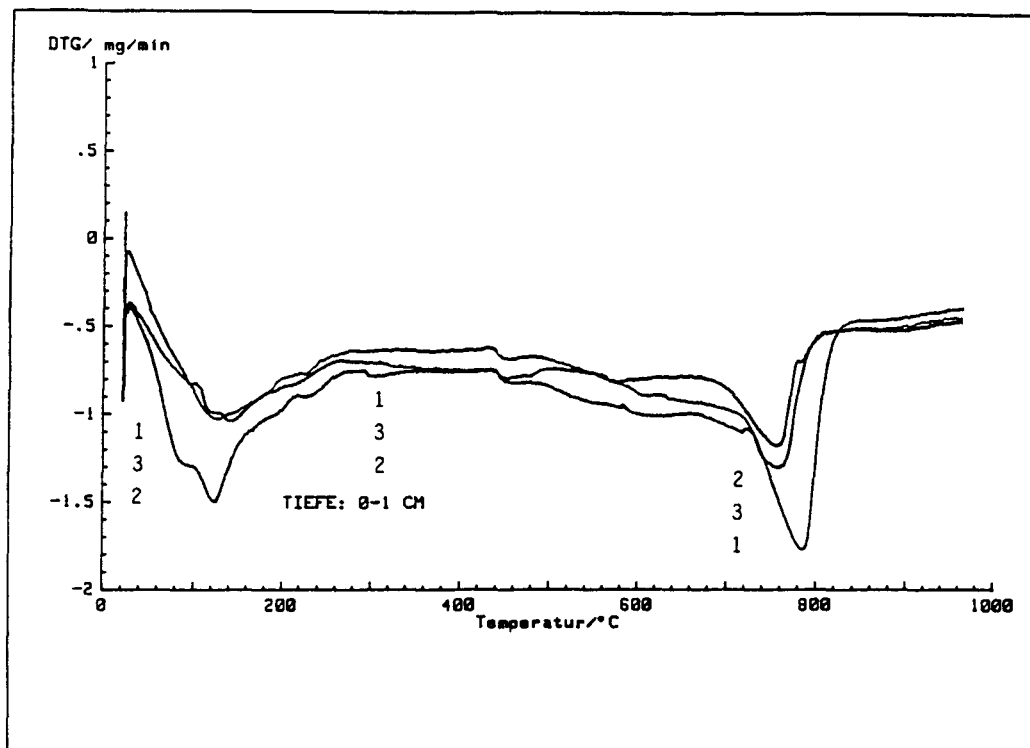


Abb. 9: DTG-Analysen von Stahlbetonproben mit eingeträgtem Trennriß. Kurve 1: Probe 9.2.90-6, Position 1 (sauerstoffarm). Kurve 2: Probe 28.3.90-7, Position 5 (sauerstoffreich). Kurve 3: Probe 7.3.90-4, atmosphärisch bewittert. Tiefen: oben 0-1 cm, unten: 5-6 cm.

6.2.3 Röntgenographische Untersuchungen

Es wurden Röntgenphasenanalysen von Pulverproben der entnommenen Bohrkern nach 4- und 17-monatiger Einlagerungsdauer angefertigt. Dabei wurden mehrere Proben aus 0-1 cm Tiefe und aus 5-8,5 cm Tiefe, sowohl aus sauerstoffreichen als auch aus sauerstoffarmen Beckenbereichen analysiert. Die Röntgendiagramme der beaufschlagten Proben unterschieden sich nicht signifikant von den Röntgendiagrammen der Referenzproben. Phasenumwandlungen durch den Einfluß des Abwassers konnten nicht eindeutig nachgewiesen werden. Zu erkennen waren neben den Zuschlagreflexen (Quarz, Feldspat, Glimmer ev. Biotit) nur geringe Mengen Portlandit bzw. Calcit.

6.3 Untersuchungen der Porenradienverteilung

Die Porenradienverteilung der Stahlbetonproben mit eingeprägten Trennrissen wurde nach 4-, 17- und 47-monatiger Einlagerungsdauer mit einem Quecksilberdruckporosimeter Carlo Erba Porosimeter 2000 analysiert. Neben einer atmosphärisch bewitterten Referenzprobe wurden wiederum Proben aus sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Beckenbereichen und aus 0-1 cm und 5-6 bzw. 6-7 cm Probentiefe untersucht.

Die Porenradienverteilungen der 17 bzw. 47 Monate beaufschlagten Probekörper sind in den Abb. 10 bis 15 dargestellt. Anzeichen für einen lösenden Angriff auf die Betonproben sind nicht zu erkennen. Weder mit zunehmender Beaufschlagungsdauer, noch im Vergleich mit den Referenzproben ist eine Vergrößerung des mit dem Quecksilberdruckporosimeter meßbaren Porenvolumens feststellbar, auch nicht in bestimmten Porenradienbereichen. Das Gegenteil ist der Fall. Das kumulative Porenvolumen nimmt in der Regel mit fortschreitender Einlagerungsdauer ab. Ganz besonders ausgeprägt ist diese Beobachtung im Innern der Proben, wo im Laufe der Nachhydratation sehr geringe kumulative Porenvolumina erreicht werden. Eine Ausnahme bildet nur die oberflächennahe Schicht der im sauerstoffarmen Bereich eingelagerten Betonproben (Abb. 11). Hier zeigt die nach 47 Monaten entnommene Probe ein größeres kumulatives Volumen (ca. $41 \text{ mm}^3/\text{g}$) als die nach 17 Monaten entnommene Probe (ca. $32 \text{ mm}^3/\text{g}$). Dieser Unterschied darf aufgrund der möglichen Prüfstreuung jedoch nicht überbewertet werden. Die entsprechende Probe zeigte außerdem nach 4-monatiger Beaufschlagung ein kumulatives Porenvolumen von $50 \text{ mm}^3/\text{g}$. Über den Gesamtzeitraum betrachtet ist also auch in diesem Fall eine Abnahme des Porenvolumens zu beobachten. Insgesamt zeigen die Porenradienverteilungen der beaufschlagten Probekörper eine für die Dichtigkeit des Materials sehr günstige Form, mit einer geringen Porosität bei großen Porenradien.

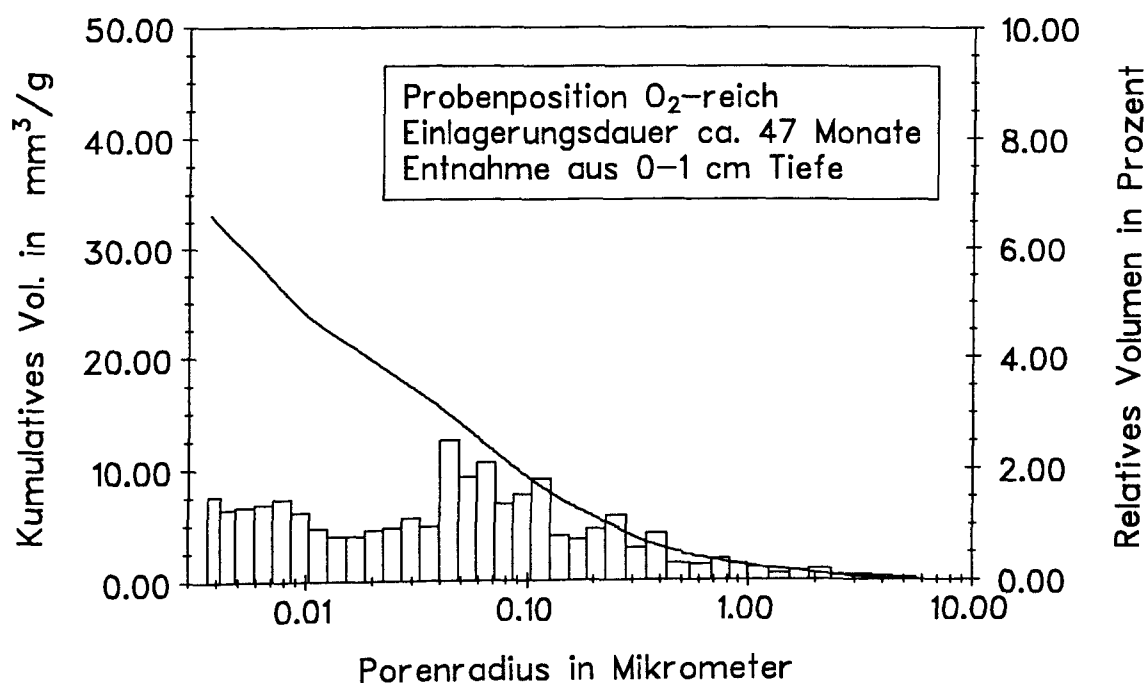
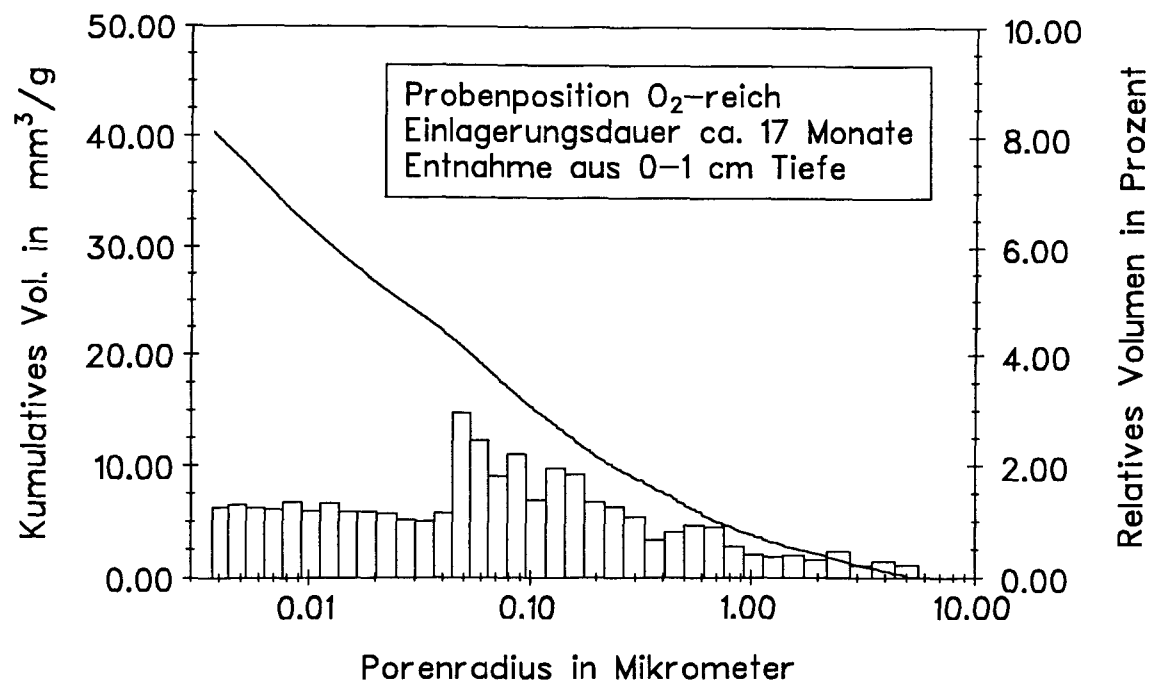


Abb. 10: Porenradienverteilungen der Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß nach verschiedener Beaufschlagungsdauer. Tiefe: 0-1 cm. Sauerstoffreicher Bereich.

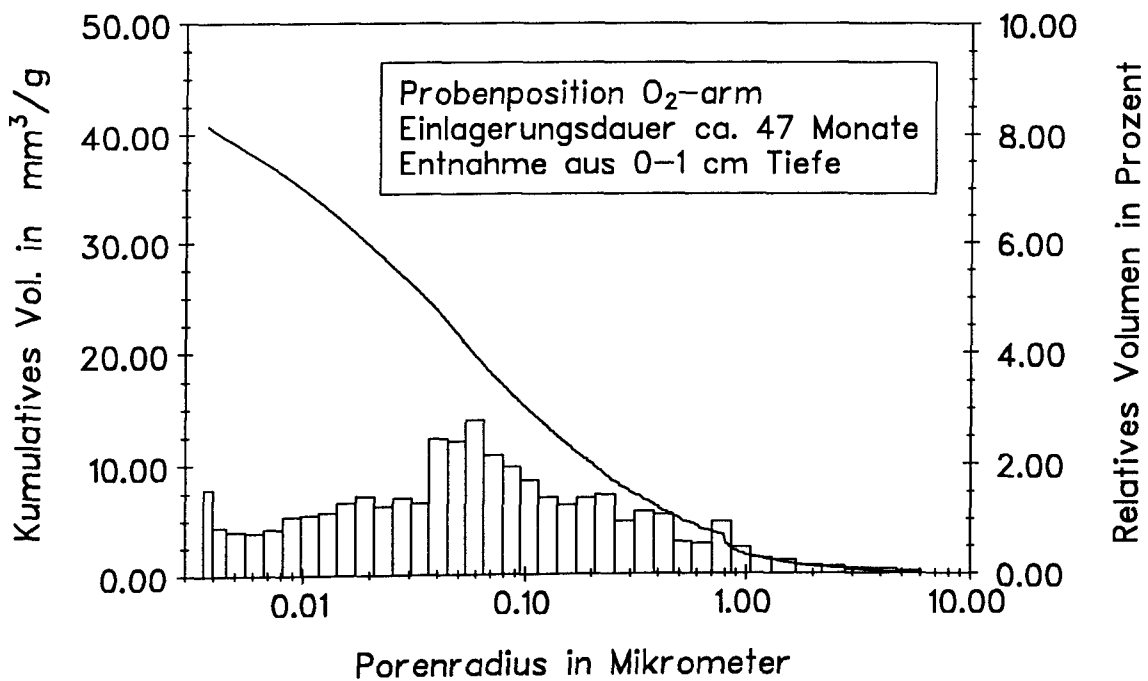
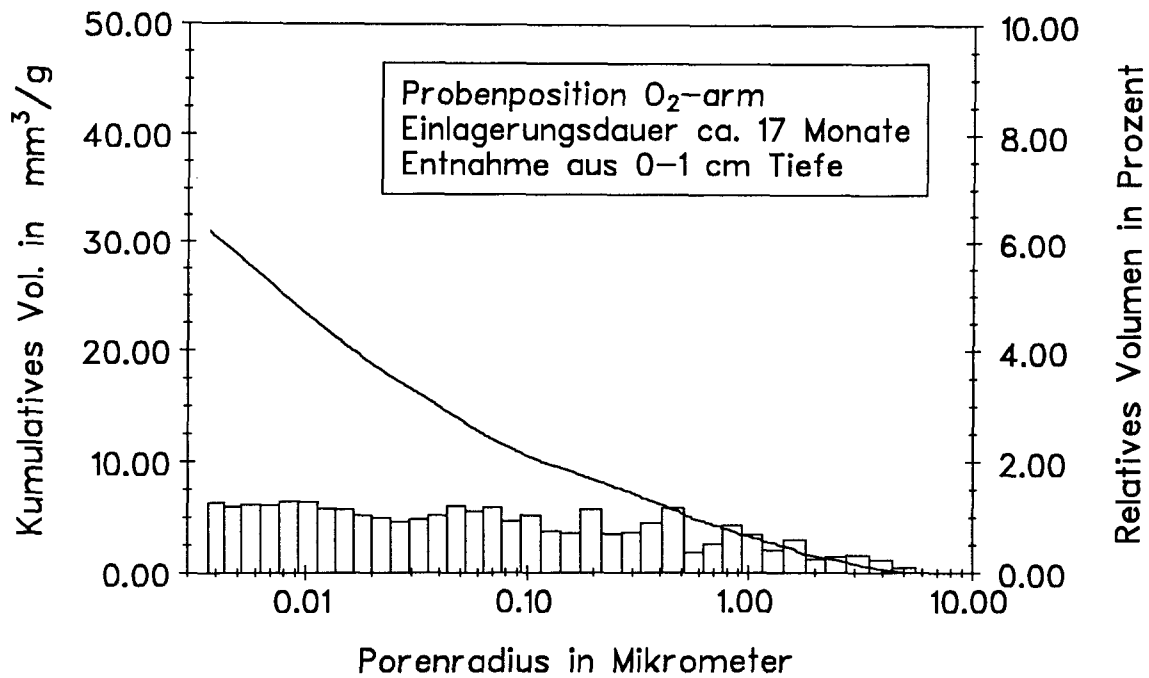


Abb. 11: Porenradienverteilungen der Stahlbetonproben mit eingeprägtem Trennriß nach verschiedener Beaufschlagungsdauer. Tiefe: 0-1 cm. Sauerstoffarmer Bereich

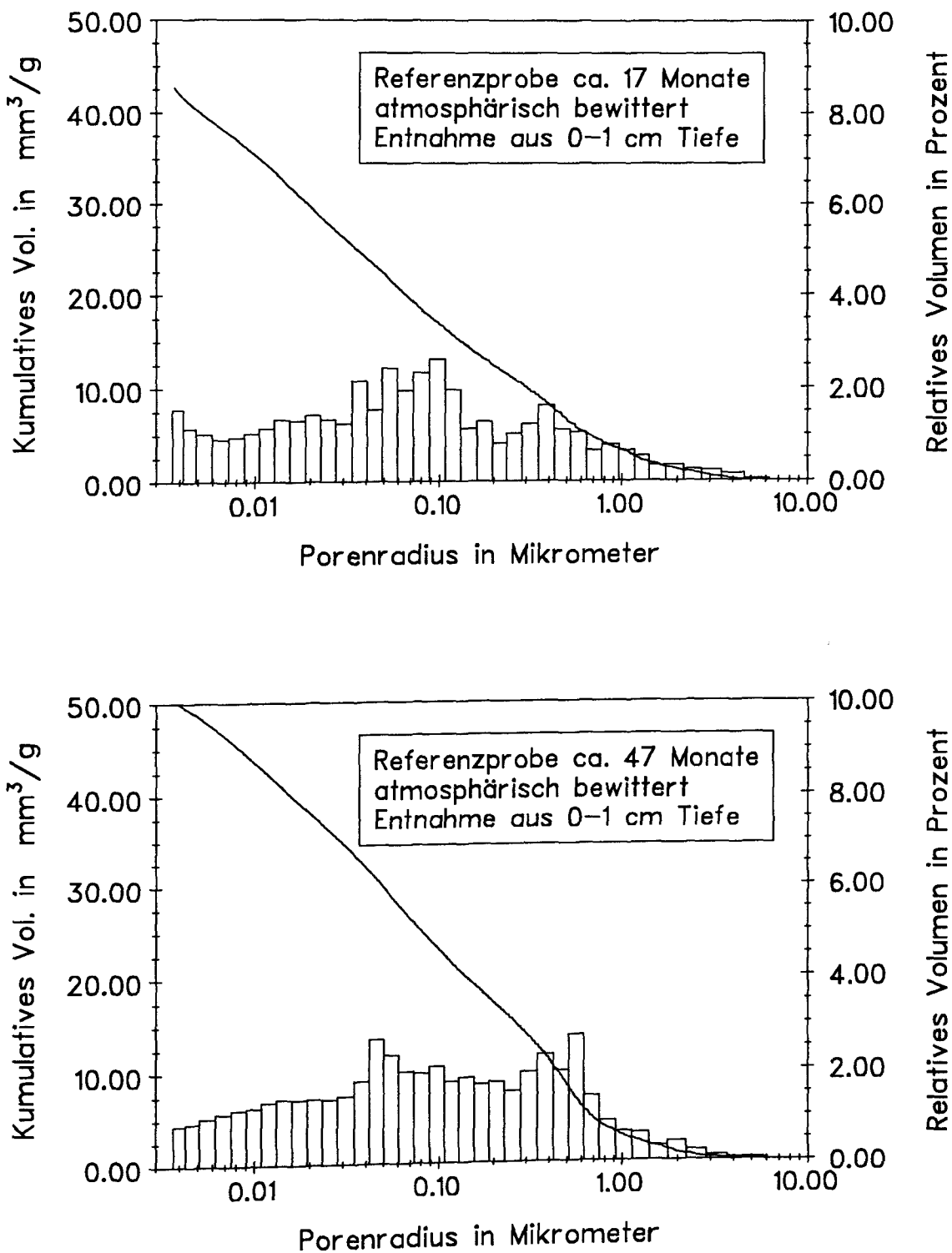


Abb. 12: Porenradienverteilungen der atmosphärisch bewitterten Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß (Referenzproben). Tiefe: 0-1 cm.

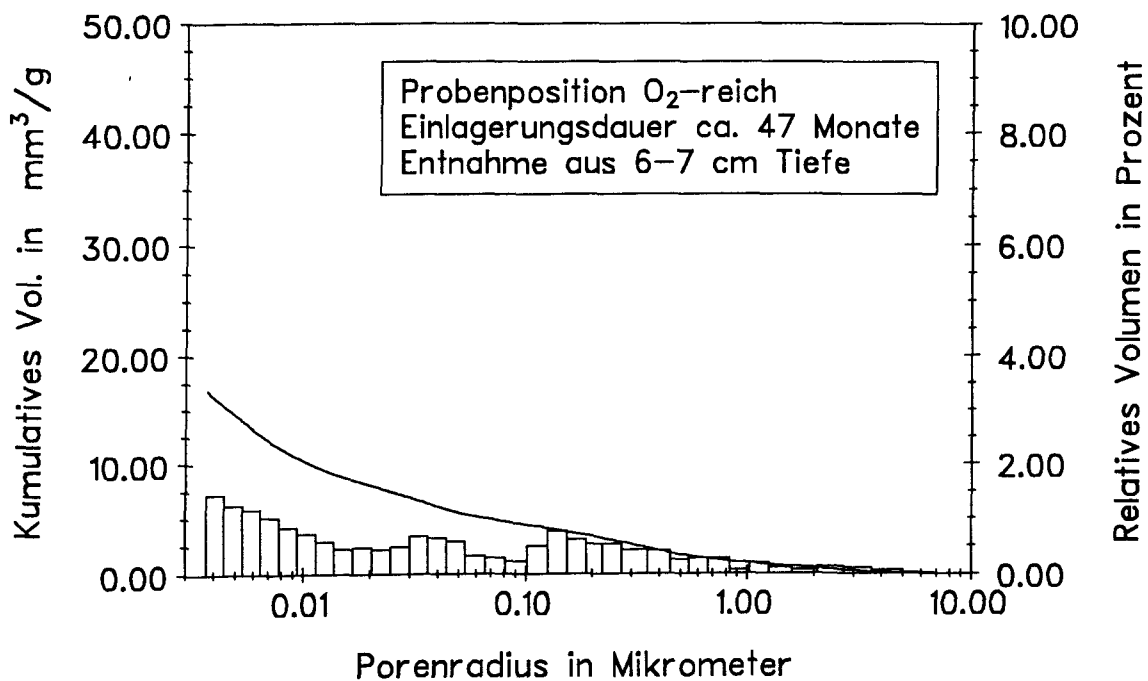
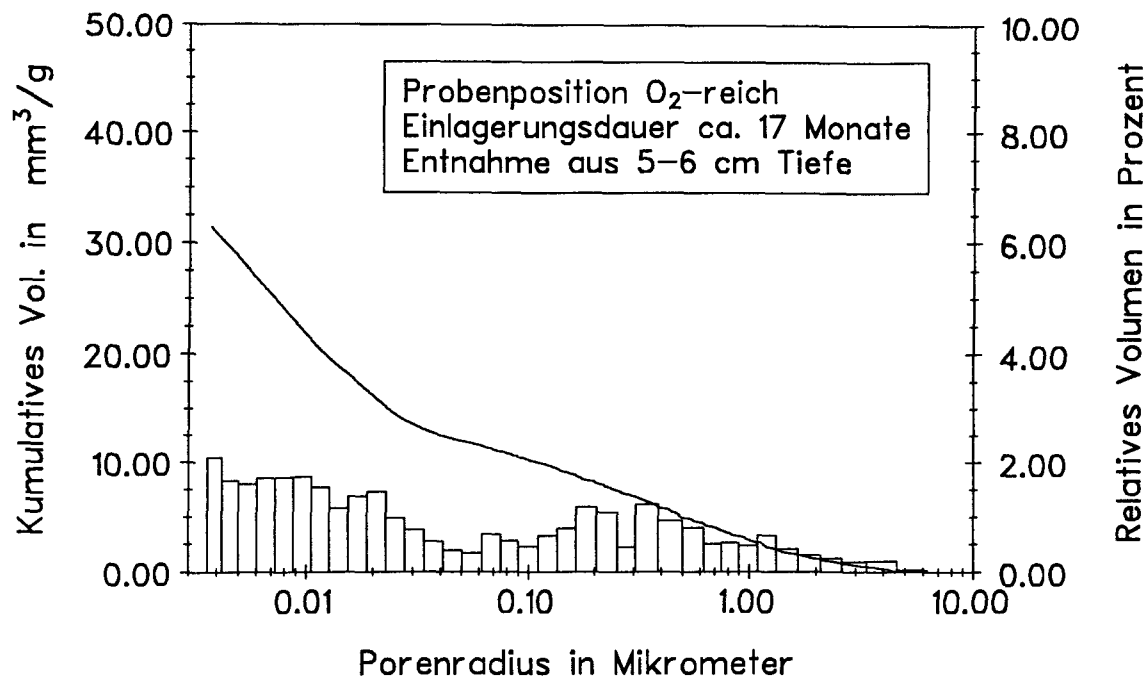


Abb. 13: Porenradienverteilungen der Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß nach verschiedener Beaufschlagungsdauer. Tiefe: 5-6 bzw. 6-7 cm. Sauerstoffreicher Bereich.

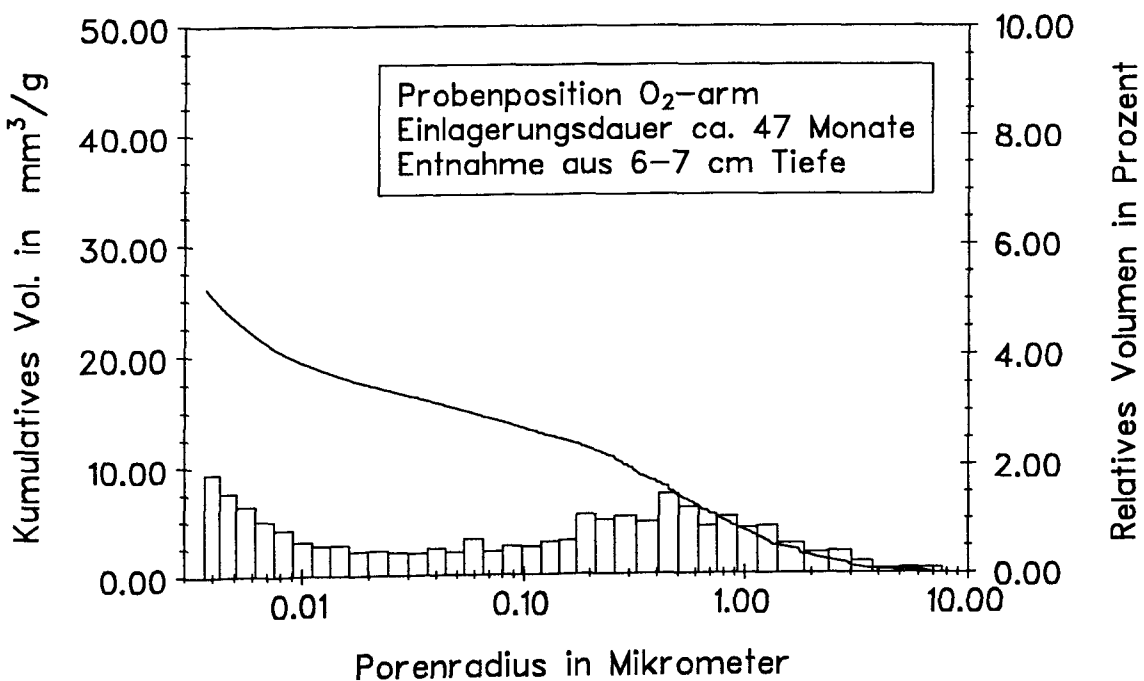
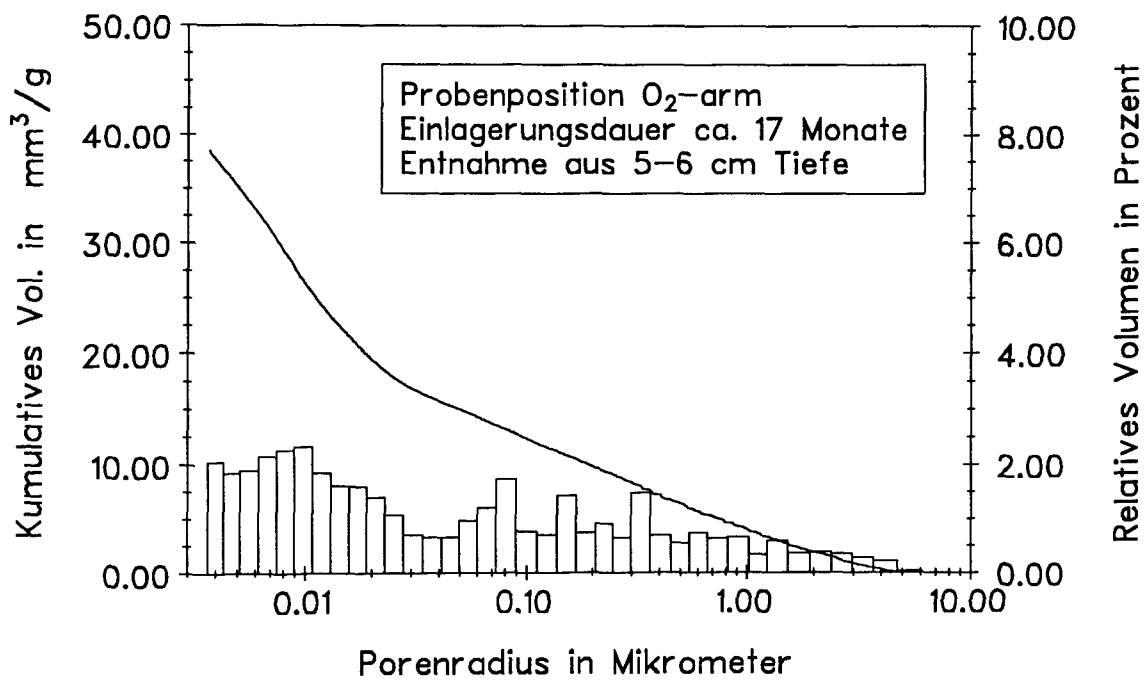


Abb. 14: Porenradienverteilungen der Stahlbetonproben mit eingepprägtem Trennriß nach verschiedener Beaufschlagungsdauer. Tiefe: 5-6 bzw. 6-7 cm. Sauerstoffarmer Bereich

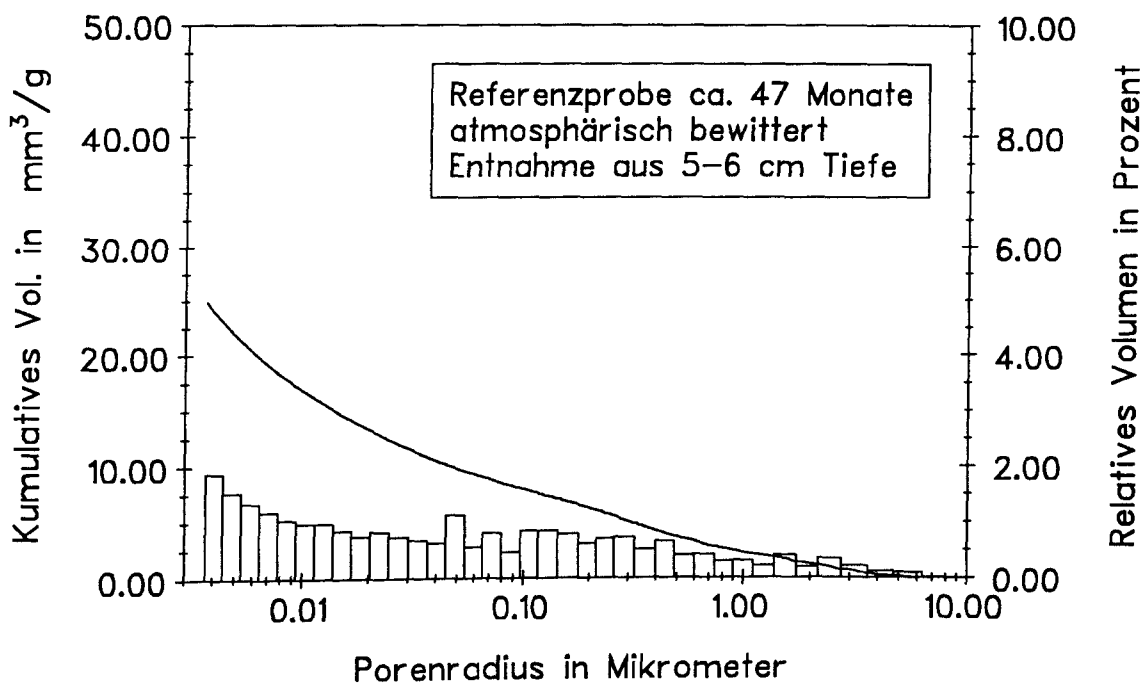
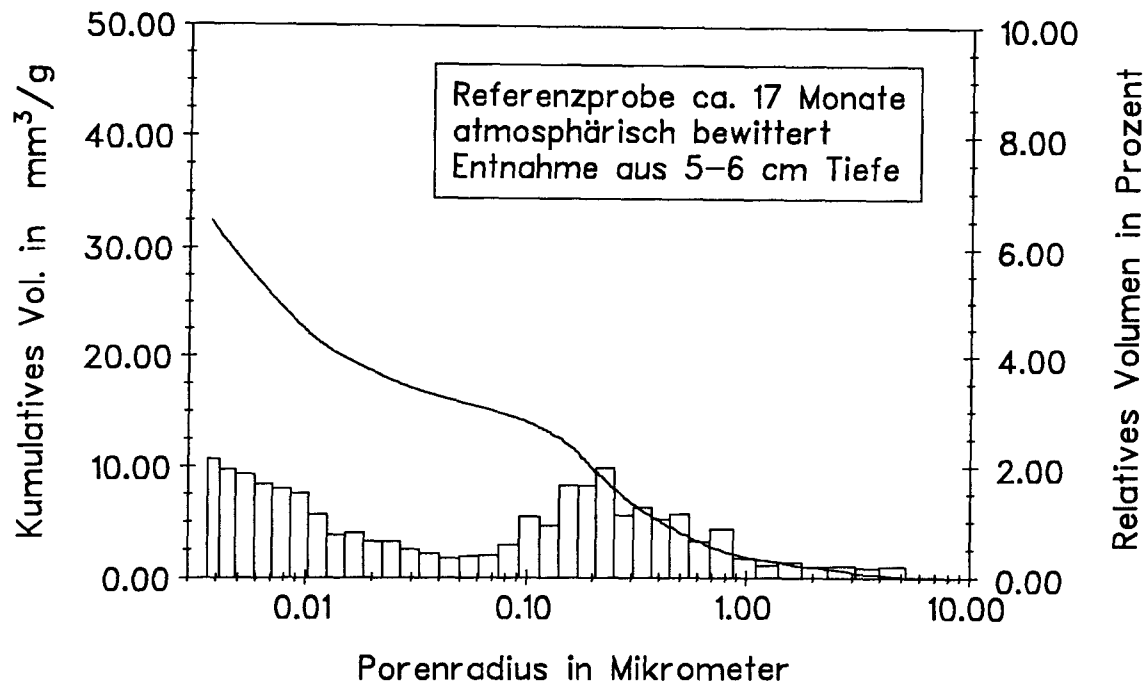


Abb. 15: Porenradienverteilungen der atmosphärisch bewitterten Stahlbetonproben mit eingepreßtem Trennriß (Referenzproben). Tiefe: 5-6 cm.

6.4 Bauwerksverfahren zur Prüfung des Wassersaugens und der Gaspermeabilität

Die Gasdurchlässigkeit und die kapillare Wasseraufnahme der Probekörper mit eingepprägten Rissen wurde mit Hilfe zweier zerstörungsarmer Bauwerksverfahren untersucht. Daneben wurden auch Messungen an den Probewänden und den Wänden des Belebungsbeckens im entleerten Zustand durchgeführt. Das ISAT-Verfahren (Initial Surface Absorption Test) bestimmt die kapillare Wasseraufnahme einer Betonoberfläche. Das Ergebnis ISA (t_s) gibt an, wieviel Milliliter Wasser pro Fläche und Zeit nach der Zeiteinheit t_s von der Betonoberfläche aufgesaugt werden. Ein anderes, am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig entwickeltes Verfahren, mißt die Permeabilität von Stickstoff durch den oberflächennahen Beton bei stationärem Gasstrom. Beide Verfahren ergänzen sich, da von der jeweiligen Messung unterschiedliche Tiefenbereiche erfaßt werden. Im einen Fall wird nur die Oberflächenschicht untersucht während im anderen Fall die Eigenschaften des Beton einer mehreren Zentimeter dicken Betonrandzone das Messergebnis bestimmen. Die Messergebnisse beider Verfahren sind Funktionen der Porosität und der Porenstruktur. Daher ist zu erwarten, daß korrosive Prozesse durch die Einwirkung des Abwassers mit beiden Verfahren beobachtet werden können, auch wenn andere Parameter, wie die Feuchte und die Temperatur, die Meßdaten ebenfalls beeinflussen. Lösende Prozesse erhöhen die Gaspermeabilität und das Wassersaugen. Eine Erniedrigung der Permeabilität und des Wassersaugens kann durch treibende Prozesse, durch Ablagerungen im Porenraum die nicht unbedingt treibend wirken müssen oder durch eine fortschreitende Hydratation hervorgerufen werden. Ein großer Vorteil beider Verfahren ist, daß sie direkt am Bauwerk angewandt werden können. Die Lage der Meßstellen beider Verfahren auf den Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen können aus Abb. 3 entnommen werden. Die Messungen wurden in ungerissenen Probenbereichen durchgeführt.

6.4.1 Wassersaugen (ISAT-Verfahren)

Mit dem ISAT-Verfahren kann das kapillare Wassersaugen der oberflächennahen Betonschicht gemessen werden [7,10,14,15]. Es ist nach British Standard 1881, Part 5 [N1] genormt. Eine Skizze der ISAT-Apparatur ist in Abb. 16 dargestellt. Die folgende Erläuterung des ISAT-Verfahrens wurde aus [5] übernommen.

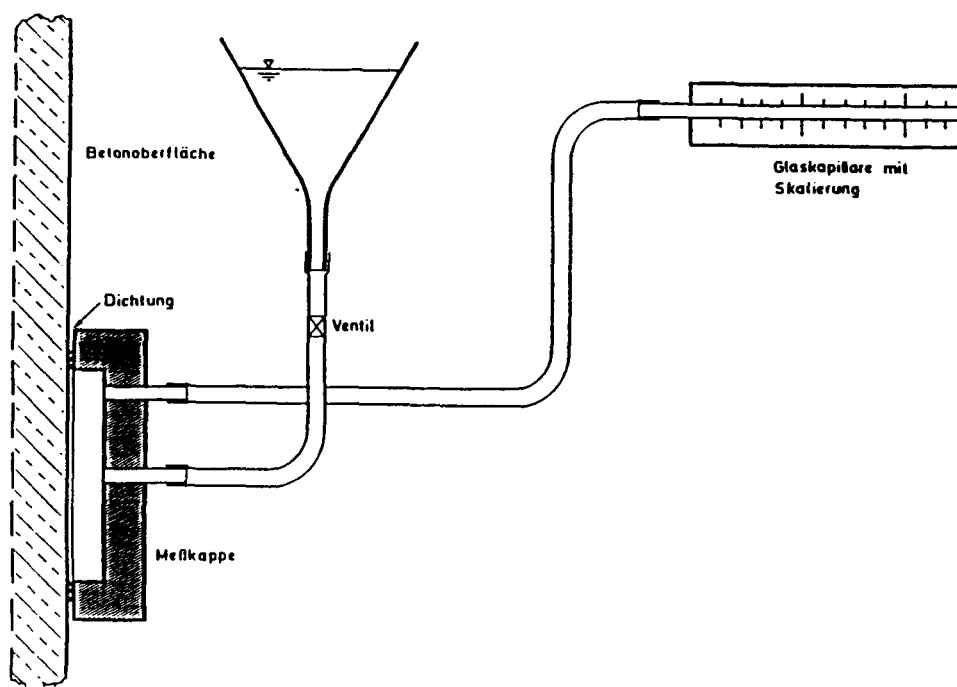


Abbildung 16: Apparatur zur Durchführung von ISAT-Messungen /N1/

Beim ISA-Test wird eine Prüfkappe (Durchmesser = 80 mm) z.B. mit Kitt wasserdicht auf der Betonoberfläche befestigt. Die Prüfkappe ist mit einem Wasserreservoir und einer skalierten Glaskapillare zu verbinden. Zwischen dem Reservoir und der Kappe ist ein Ventil erforderlich. Versuchsbeginn ist die Wasserfüllung der Kappe über das angeschlossene Reservoir bei geöffnetem Ventil. Der Wasserspiegel des Reservoirs befindet sich ca. 200 mm über der Kappenmitte und liegt mit der horizontal auszurichtenden Kapillare auf einer Höhe. Damit ist diese ebenfalls vollständig gefüllt, ohne daß aus ihrem offenen Ende nennenswerte Wassermengen während des weiteren Versuchsablaufs austreten.

Zu bestimmten Zeiten nach Versuchsbeginn kann nun die Ablesung des ISA-Wertes erfolgen. Im Regelfall ist es ausreichend nur eine Ablesung zum Zeitpunkt $t=10$ Minuten durchzuführen (ISA₁₀-Wert). Dazu wird ca. 2 Minuten vor diesem Zeitpunkt mittels des Ventils die Wasserzufuhr zwischen Meßkappe und Reservoir unterbrochen. Eine weitere Wasseraufnahme des Betons führt zu einer von der Betondichtigkeit abhängigen Veränderung des Wasserstandes in der Glaskapillare. Die Veränderung dieses Wasserstandes während des Zeitraumes von einer Minute, abgelesen in Skalenteile der Kapillare, ist die Betondichtigkeit ausgedrückt als ISA₁₀-Wert (durch einen Eichvorgang ist die Skalierung so festgelegt, daß der Abstand zwischen zwei Skalenteilen einem ISA-Wert von $0,01 \text{ ml m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ entspricht).

Im Normalfall ist eine Vorbehandlung der zu prüfenden Oberfläche nicht erforderlich. Eventuell vorhandene Verunreinigungen oder Ablagerungen müssen entfernt werden. Nach Augenschein beurteilt sollte die Meßfläche frei von Rissen sein. Die Messung kann an vor Niederschlägen geschützten Bauteilen jederzeit durchgeführt werden. Bei Bauteilen die ungeschützt der Witterung ausgesetzt sind, sollten mindestens 48 Stunden seit dem Ende des letzten Regensfalls vergangen sein.

ISAT-Messungen wurden sowohl an den Beckenwänden, als auch an den Probewänden und den Stahlbetonproben mit eingepprägten Rissen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Abb. 17 bis 20 dargestellt.

Bei den meisten Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen ist zunächst ein leichter Abfall der ISA_{10} -Werte zu beobachten, der auf die Nachhydratation der Proben zurückgeführt werden kann. Anschließend zeigt die überwiegende Zahl der Proben einen mehr oder weniger konstanten ISA_{10} -Wert. Wenige Proben zeigen stark ansteigende ISA_{10} -Werte. Ein generelles Ansteigen der ISA_{10} -Werte innerhalb einer Probenposition, das als Anzeichen für einen lösenden Angriff gedeutet werden könnte, ist jedoch nicht erkennbar. Der Anstieg bei einzelnen Proben kann u.U. darauf zurückgeführt werden, daß diese Proben vor der Schlußmessung im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz vergleichsweise stark austrocknen konnten (Messung im Labor). Alle Zwischenmessungen wurden direkt auf der Kläranlage durchgeführt. Die gemessenen ISAT-Werte liegen im Bereich eines qualitativ hochwertigen Betons. Sie sind vergleichbar mit den entsprechenden Werten der Probewände und der Beckenwände. Die atmosphärisch bewitterten Referenzproben zeigen ein sehr uneinheitliches Bild. Fünf von acht untersuchten Proben zeigten am Ende des Beaufschlagungszeitraums ISAT-Werte im Bereich der eingelagerten Stahlbetonprobekörper. Drei Proben zeigten z.T. sehr hohe ISAT-Werte. Der Grund dafür ist nicht bekannt. Der Vergleich der ISAT-Werte der beaufschlagten Probekörper mit den Referenzproben und den untersuchten Probewänden und Bauteile liefert jedoch keinerlei Anzeichen für einen korrosiven Angriff.

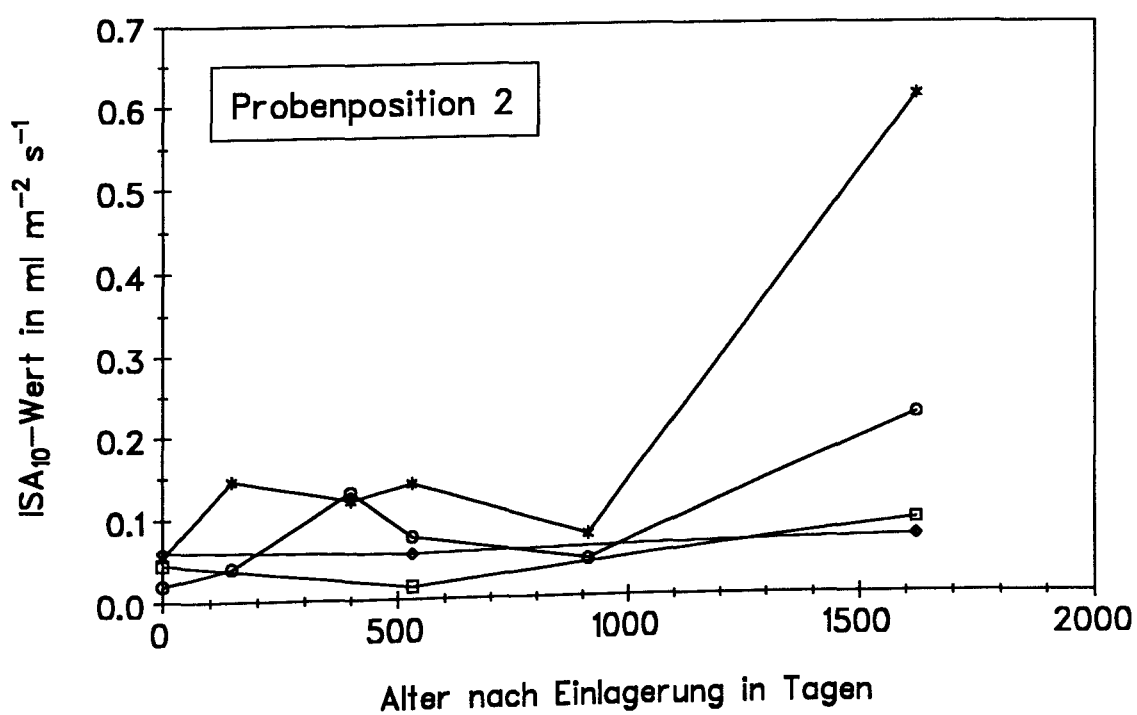
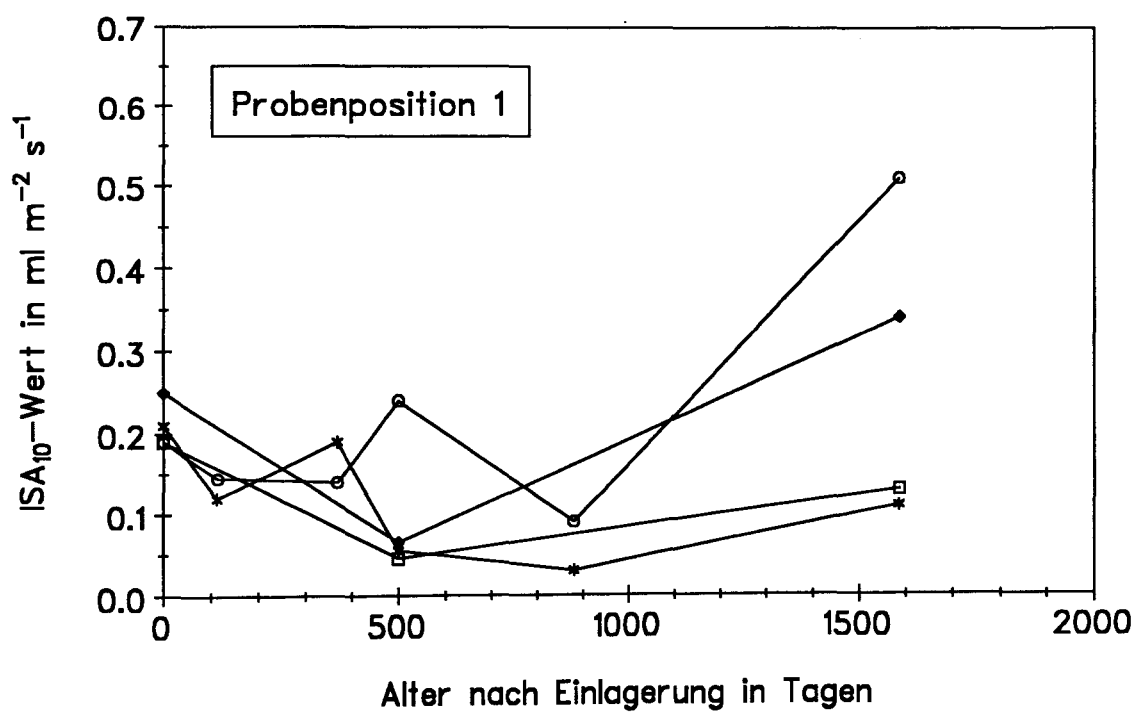


Abb. 17: ISA₁₀ Werte der beaufschlagten Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit.

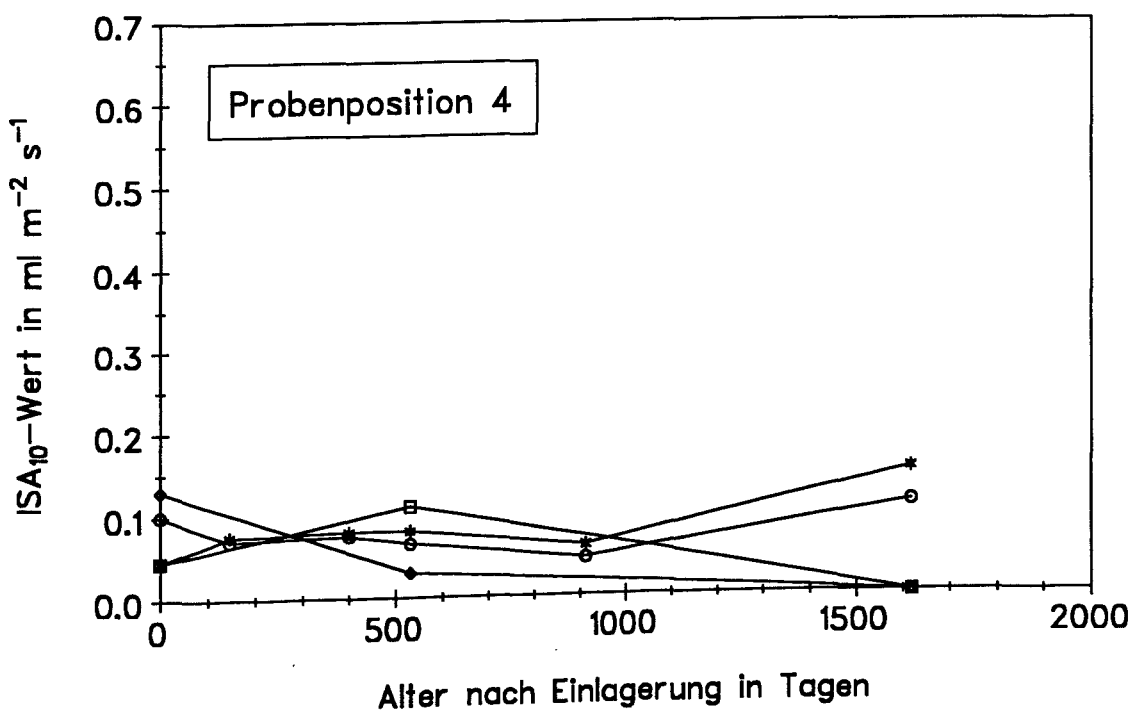
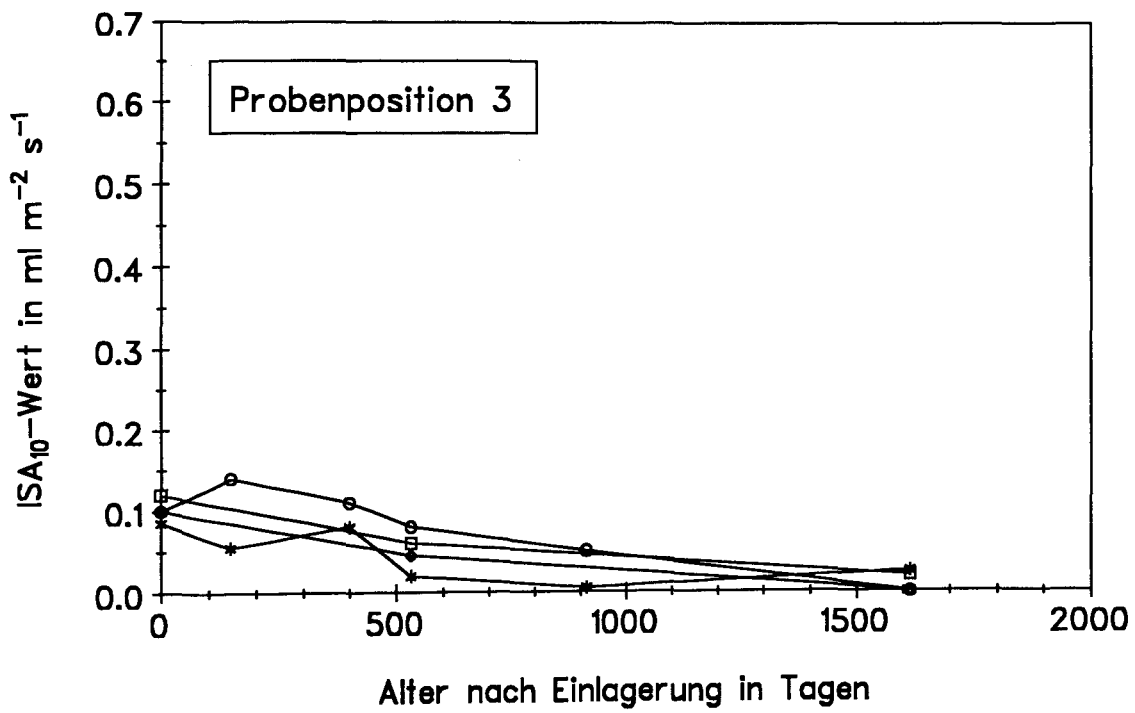


Abb. 18: ISA₁₀-Werte der beaufschlagten Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit.

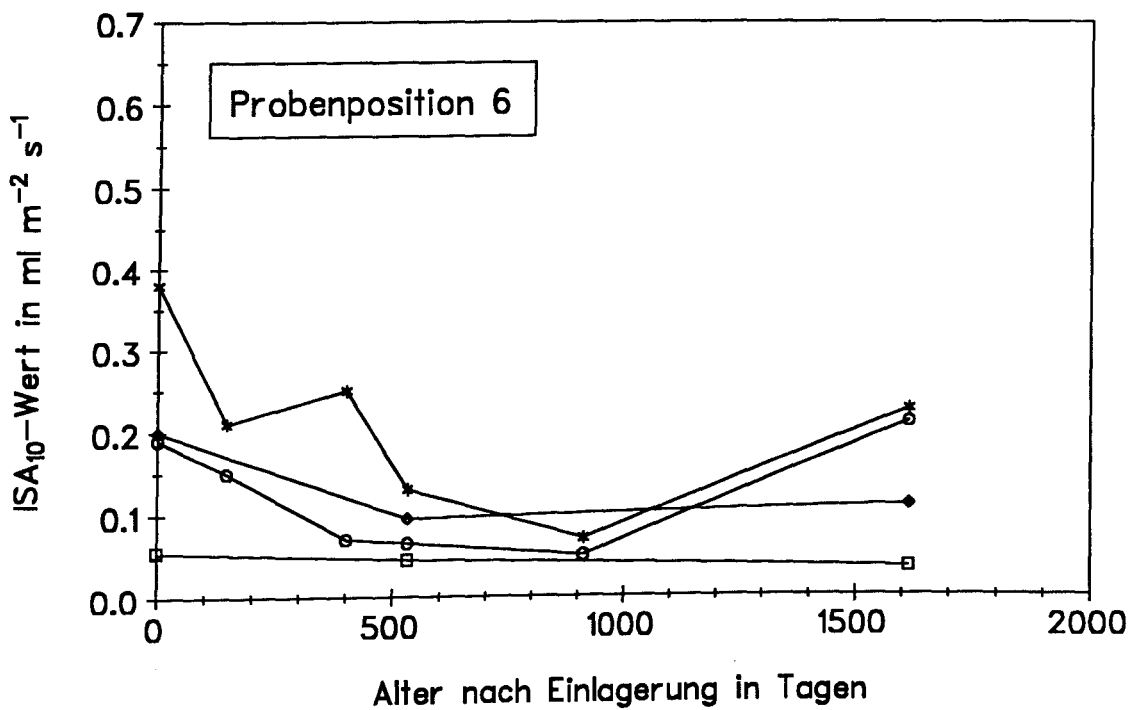
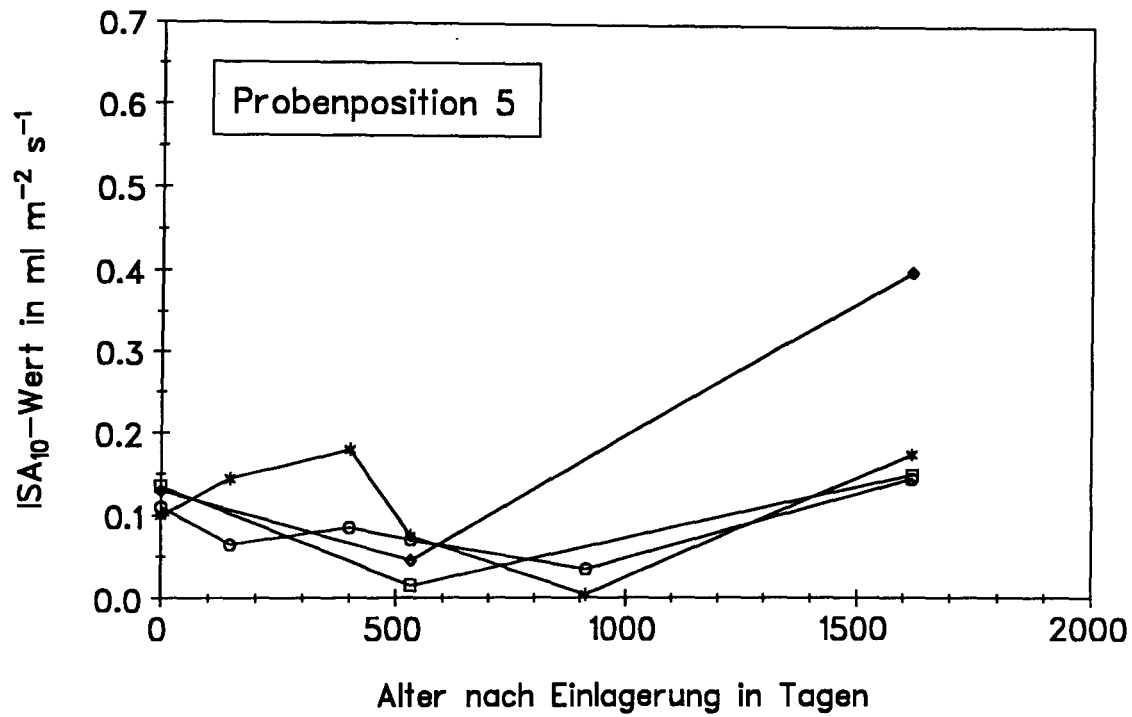


Abb. 19: ISA₁₀-Werte der beaufschlagten Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit.

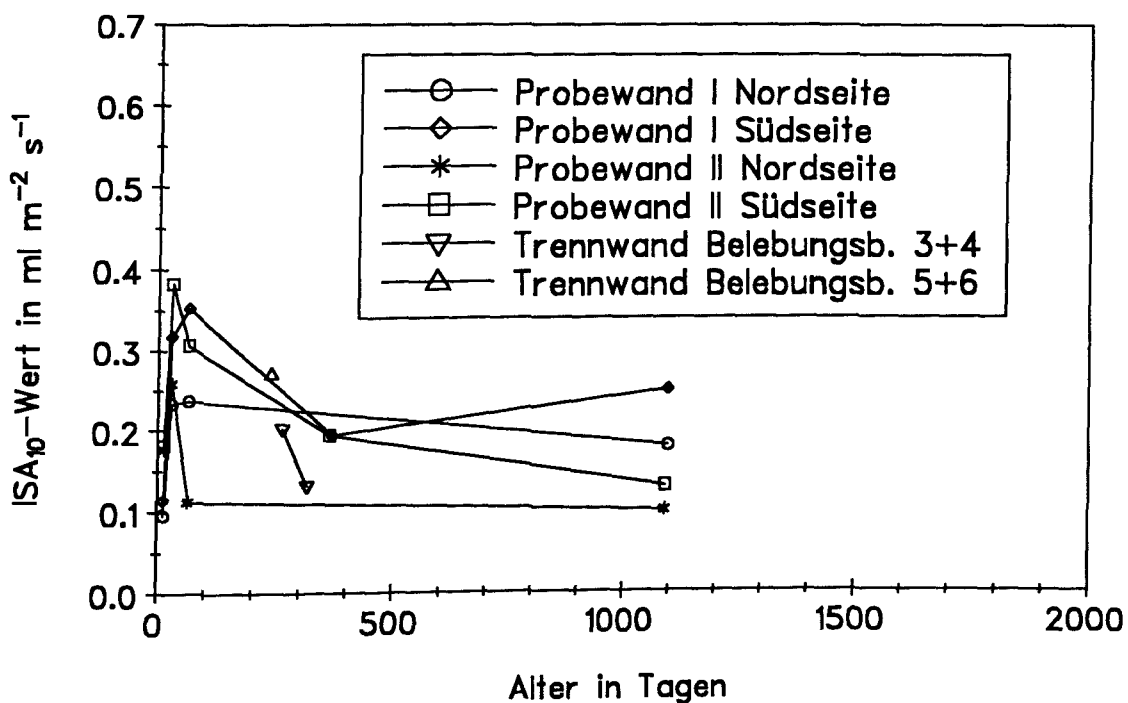
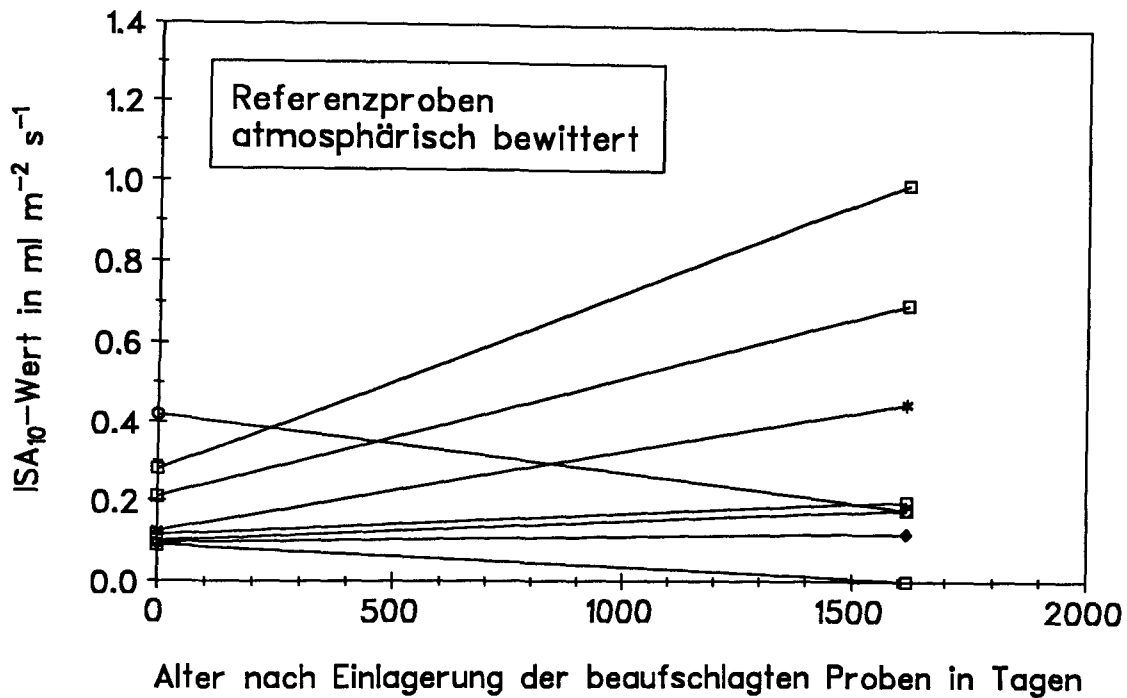


Abb. 20: Oben: ISA_{10} -Werte der Stahlbetonkörper mit Trennriß (Referenzproben) als Funktion der Zeit (Verdoppelung des Maßstabs der Ordinate). Unten: ISA_{10} -Werte der Probewände und der Trennwände zwischen den Belebungsbecken 3+4 bzw. 5+6 als Funktion der Zeit.

6.4.2 Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht

Von Paulmann /13/ wurde am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig ein Verfahren zur Messung der Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht entwickelt. Der Aufbau der Apparatur ist in Abb. 21 dargestellt. Über einen Packer wird Stickstoff in ein Bohrloch eingepresst. Die Tiefe des Bohrlochs und die Länge des Packers kann an die zu untersuchende Fragestellung angepasst werden. In den hier durchgeführten Untersuchungen betrug die Bohrlochtiefe stets 45 mm und die durch den Packer abgedichtete Bohrlochlänge 35 mm. Das Gas permeiert durch die oberflächennahe Betonschicht und wird in einem kreisringförmigen Gassammler aufgefangen. Nach der Einstellung eines stationären Gasflusses wird der Durchfluß, z.B. über einen Blasenähler oder über den Druckanstieg bei sehr geringem Gegen- druck, z.B. über ein Schrägrohrmanometer, gemessen.

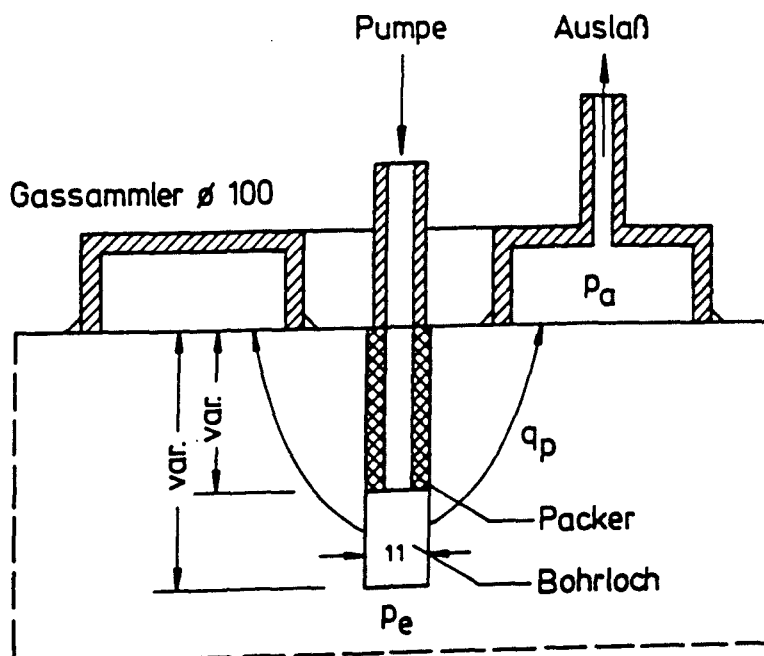


Abb. 21: Apparatur zur Messung der Gaspermeabilität bei stationärem Gasstrom nach /13/.

Grundlage für die Versuchsauswertung ist das Hagen-Poiseuille-Gesetz für die laminare Strömung von inerten Gasen durch poröse Körper unter Berücksichtigung der Komprimierbarkeit des Gases. Es lautet: /8,26/:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = k \cdot \frac{A}{\eta \cdot x} \cdot \frac{(p_e - p_a) \cdot (p_e + p_a)}{2 \cdot p_m} \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei bedeuten:	Q	Gasvolumenstrom
	V	Gasvolumen, das die Probe im Zeitintervall Δt durchfließt
	t	Zeit
	k	spezifischer Permeabilitätskoeffizient
	A	durchströmte Fläche
	x	durchströmte Schichtdicke
	η	Viskosität des Gases
	p_e	Eingangsdruck des Gases
	p_a	Ausgangsdruck des Gases
	p_m	Druck bei dem das durchströmende Gasvolumen gemessen wird

Da der geometrische Term A/l bei diesem wie auch bei anderen Bauwerksverfahren nicht genau bestimmt werden kann, können mit dem Verfahren nicht unmittelbar Permeabilitätskoeffizienten gemessen werden, sondern nur ein Permeabilitätsmaß. Das verwendete Meßverfahren arbeitet jedoch mit einem nahezu stationären Gasstrom. Aus diesem Grund und wegen der Konstanz des Quotienten A/l bei ein und demselben Beton kann aus dem Permeabilitätsmaß der Permeabilitätskoeffizient berechnet werden. Dazu sind Vergleichsmessungen mit Laborverfahren, bei denen eine eindimensionale Strömung vorliegt, notwendig. Das hier verwendete Permeabilitätsmaß M ist durch folgende Zahlenwertgleichung definiert /5,13/:

$$M = Q \cdot \eta \cdot (p_e^2 - 1)^{-0,91} \cdot \left(\frac{x}{25} \right)^{1,47} \quad (\text{Gl. 2})$$

Dabei ist der Gasvolumenstrom in mm^3/s , die Viskosität in 10^6Ns/m^2 , der Eingangsdruck in bar und die durchströmte Schichtdicke in mm (hier stets 35 mm) anzugeben. Von Paulmann /13/ wurde folgender Zusammenhang zwischen dem Permeabilitätsmaß M und dem Permeabilitätskoeffizienten k ermittelt, der auch hier angewandt wurde:

$$k = 2,6 \cdot 10^{-18} \cdot M^{0,72} \quad \text{mit } k \text{ in } \text{m}^2 \quad (\text{Gl. 3})$$

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen sind in den Abb. 22 bis 24 dargestellt. In der Regel wurden die Messungen abgebrochen, falls der Gasdurchfluß so gering war, daß nach 180 Sekunden noch kein Meßwert gewonnen werden konnte. Der diesem Zeitraum entsprechende Permeabilitätskoeffizient ist in den Diagrammen als waagerechter Strich eingetragen. Vereinzelt, längere Messungen wurden ebenfalls auf dieser „Meßgrenze“ eingetragen.

Ähnlich wie im Falle der ISA_{10} -Werte ist auch hier zunächst über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren ein genereller Abfall der Gaspermeabilität festzustellen. Anschließend kommt es i.d.R. zu einer Stagnation oder einem leichten Wiederanstieg der Meßwerte. Anzeichen für einen lösenden Angriff, d.h. eine Zunahme der Gaspermeabilität aller Proben einer Probenposition sind nicht zu erkennen. Die Tatsache, daß viele der beaufschlagten Proben die oben genannte „Meßgrenze“ erreichten zeigt, daß es sich hier um einen qualitativ hochwertigen, dichten Beton handelt. Die Gaspermeabilität der beaufschlagten Proben war im Mittel auch deutlich geringer als die der atmosphärisch bewitterten Referenzproben. Diese zeigten zum Zeitpunkt der Einlagerung der beaufschlagten Proben Werte des Permeabilitätskoeffizienten zwischen $3,6 \cdot 10^{-15}$ und $7,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ sowie im Alter von 1854 Tagen nach Einlagerung der beaufschlagten Proben Werte zwischen $2,5 \cdot 10^{-16}$ und $1,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Die erhöhte Gaspermeabilität der Referenzproben ist wahrscheinlich auf eine verminderte Nachhydratation (keine dauernde Feuchtlagerung) und die gegenüber den beaufschlagten Proben verstärkte Carbonatisierung zurückzuführen.

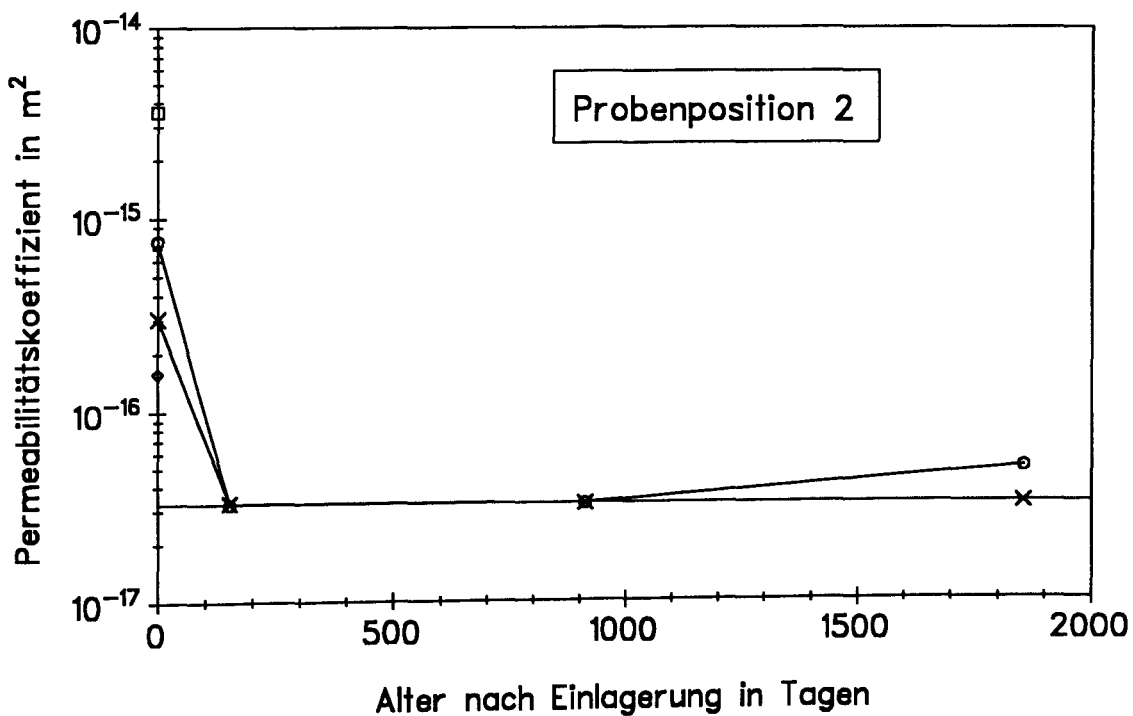
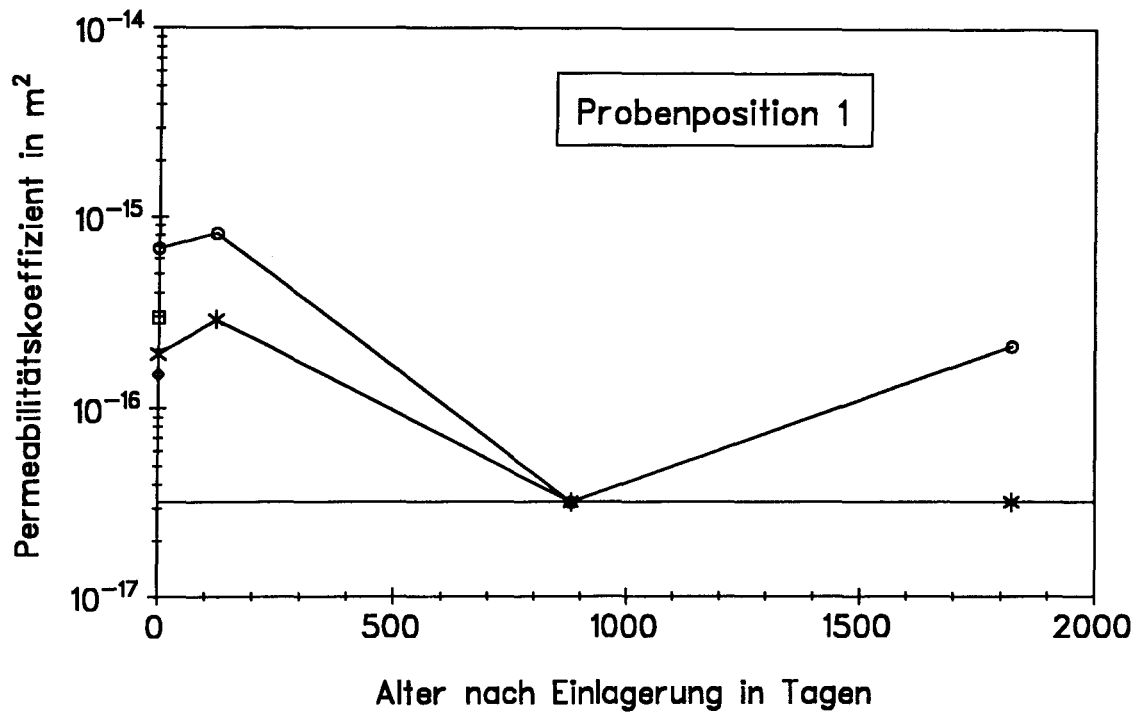


Abb. 22: Messungen der Gaspermeabilität der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit.

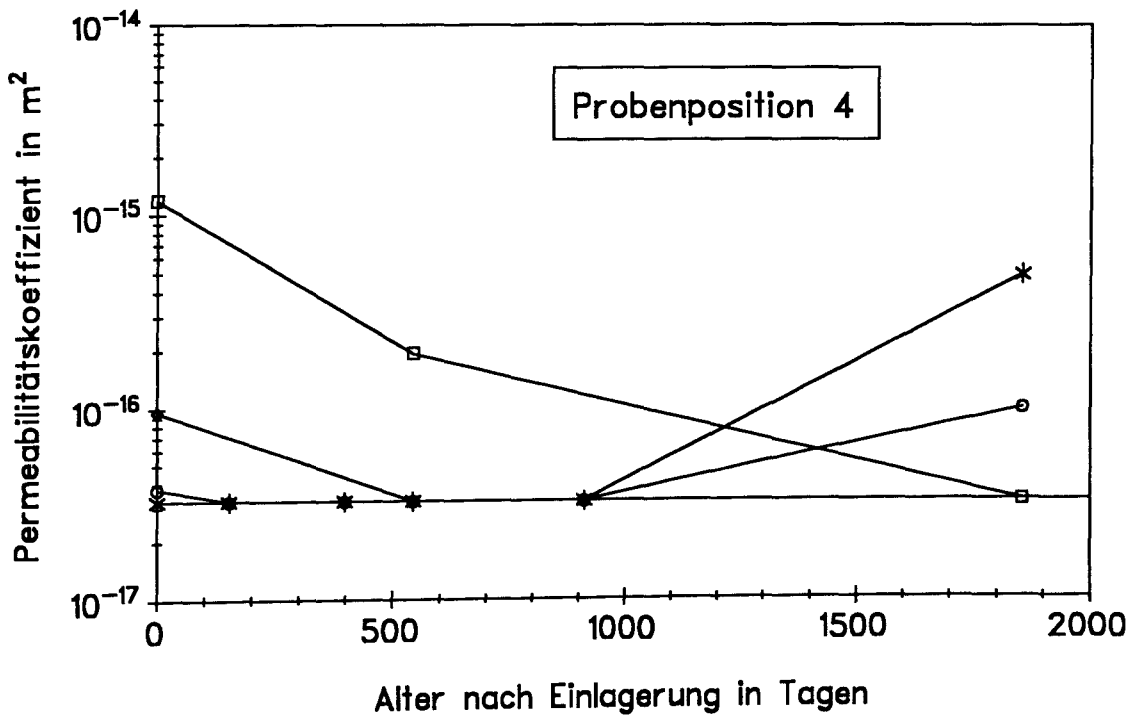
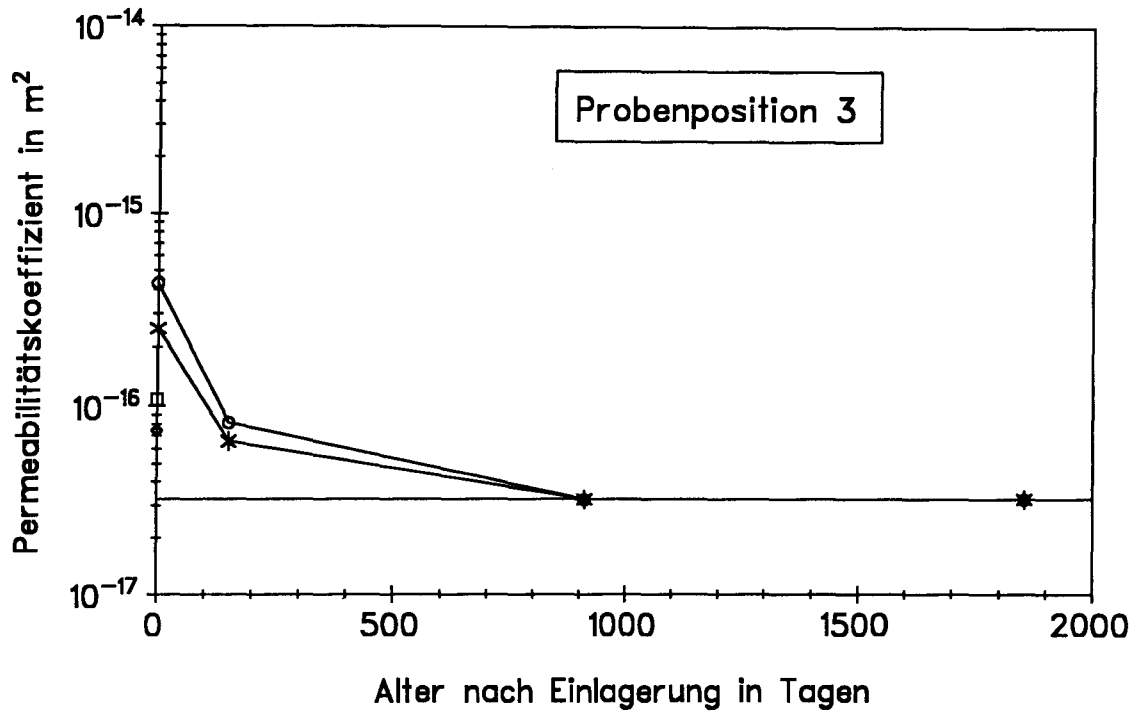


Abb. 23: Messungen der Gaspermeabilität der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit.

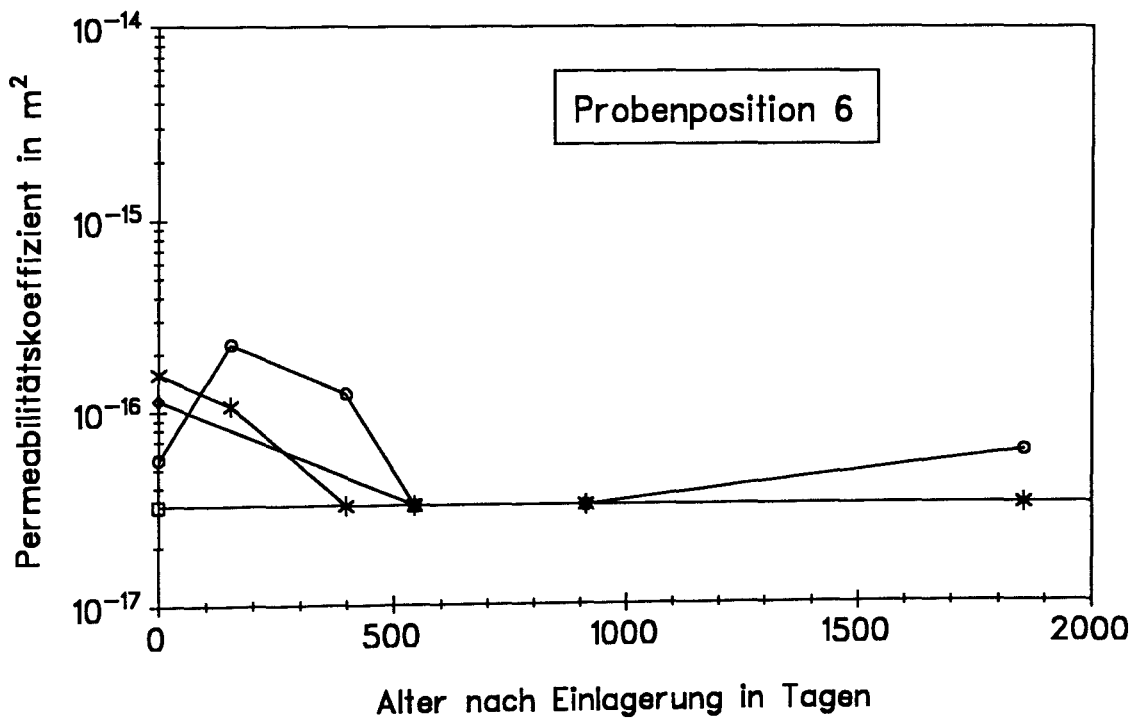
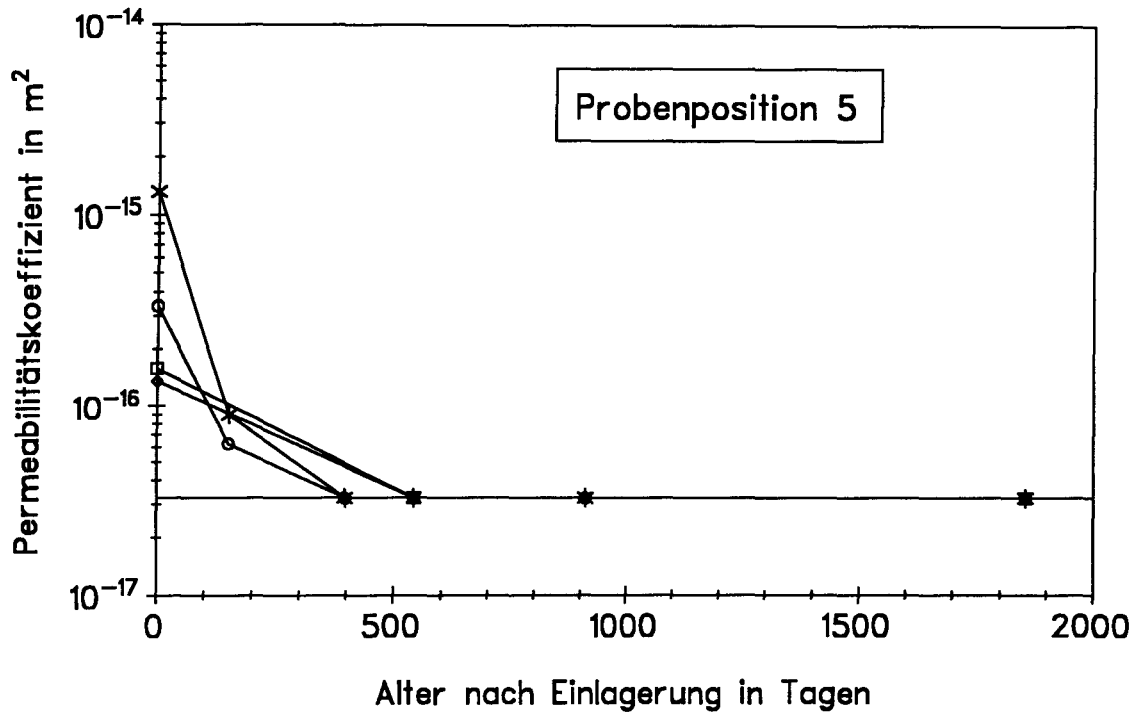


Abb. 24: Messungen der Gaspermeabilität der Stahlbetonkörper mit Trennriß als Funktion der Zeit.

6.5 Chemische Analysen

Nach 17-monatiger Einlagerungsdauer wurde ein Teil der Stahlbetonprobekörper mit eingepprägten Trennrissen auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff analysiert. Dazu wurde Bohrmehl aus einer Tiefe von 0-1 cm und 5-6 cm, aus sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Beckenbereichen sowie zum Vergleich aus einer atmosphärisch bewitterte Referenzprobe untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefaßt.

Tab. 8: Chemische Analysen auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff von verschiedenen Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen.

Probe	Tiefe in cm	Probenposition	Bemerkung	Masseproz. Chlorid	Masseproz. Gesamt-Stickstoff
28.3.90-7	0-1	5	O ₂ -reich	0,009	0,33
28.3.90-7	5-6	5	O ₂ -reich	0,006	0,10
9.2.90-6	0-1	1	O ₂ -arm	0,002	0,15
9.2.90-6	5-6	1	O ₂ -arm	0,009	0,18
7.3.90-4	0-1		Referenz	0,004	0,22
7.3.90-4	5-6		Referenz	0,004	0,09

Man kann erkennen, daß nur die im sauerstoffreichen Bereich des Belebungsbeckens eingelagerte Probe im Oberflächenbereich gegenüber der Referenzprobe erhöhte Konzentrationen an Chlorid und Gesamt-Stickstoff aufweist. Diese Erhöhung ist jedoch sehr gering und kann durch die statistische Streuung der Analyse bedingt sein. So enthält die Probe 9.2.90-6 in 5-6 cm Tiefe genausoviel Chlorid wie die Probe aus dem sauerstoffreichen Bereich in 0-1 cm Tiefe. Einen korrosionsverstärkenden Einfluß von Chloridionen bzw. Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit) auf die Bewehrung ist damit nicht zu erwarten.

6.6 Untersuchung der Stahlbewehrung auf Korrosion

Nach 17- und 47-monatiger Einlagerungsdauer wurde der Zustand der Bewehrung der Stahlbetonprobekörper mit eingepprägten Trennrissen untersucht. Die zu diesem Zeitpunkt entnommenen Bohrkerne wurden in die Bereiche eingebracht, die sowohl Bewehrung, als auch Risse in der maximalen Rißbreite enthielten. Die Bewehrung wurde freigelegt und auf ihren Korrosionszustand überprüft. Dabei konnte je nach Betonüberdeckung und maximaler Rißbreite, im Rißbereich ab-

gestufte Korrosionserscheinungen beobachtet werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen (s.a. Tab. 9):

- Vorliegende Korrosion ging in den meisten Fällen deutlich sichtbar vom Riß aus und war noch einige Millimeter in den benachbarten Beton hinein zu verfolgen.
- Bei einigen Proben konnte eine deutliche Zunahme der Korrosion mit der Einlagerungsdauer beobachtet werden. Die entsprechenden Bedingungen hinsichtlich Rißbreite und Betonüberdeckung werden weiter unten genannt. In einigen Fällen war keine Zunahme der Korrosion erkennbar.
- Keinerlei Korrosion der Bewehrung (blanker Stahl) konnte nur bei 5 cm Betondeckung und einer maximalen Rißbreite bis zu 0,2 mm beobachtet werden.
- Oberflächliche Korrosion ohne deutliche Narbenbildung (Flugrost) wurde bei 5 cm Betondeckung und Rißbreiten zwischen 0,2 und 0,3 mm beobachtet. Eine Verstärkung der Korrosion während des Einlagerungszeitraumes wurde in diesem Fall nicht beobachtet. Proben mit 5 cm Betondeckung und Rißbreiten $\geq 0,6$ mm, die nach 17 Monaten nur Flugrost aufwiesen, zeigten nach 47 Monaten eine deutlich verstärkte Korrosion. Bei einer Betondeckung von 2 cm konnte Flugrost nach 47 monatiger Einlagerung nur bei einer Probe mit einer Rißbreite von max. 0,15 mm beobachtet werden. Eine Probe mit 0,25 mm Rißbreite zeigte nach 47-monatiger Einlagerung deutlich verstärkte Korrosion.
- Stärkere Korrosion mit Narbenbildung konnte bei 2 cm Betondeckung und 47-monatiger Einlagerung ab einer Rißbreite von 0,15 mm beobachtet werden. Bei 5 cm Betondeckung und 47-monatiger Einlagerung konnte eine Narbenbildung ab einer Rißbreite von 0,6 mm beobachtet werden. Eine Aussage über den Rißbreitenbereich zwischen $> 0,3$ mm und $< 0,6$ mm kann nicht getroffen werden.
- Die Bewehrung der atmosphärisch bewitterten Referenzproben zeigte bei gleicher Rißbreite und Betonüberdeckung ähnliche Korrosionserscheinungen wie die beaufschlagten Proben.
- Eine signifikante Abhängigkeit der Korrosion von der Einlagerung in sauerstoffreiche bzw. sauerstoffarme Bereiche des Belebungsbeckens konnte nicht festgestellt werden.
- Auch bei Narbenbildung war noch keine wesentliche Verminderung der Stahlquerschnitte gegeben.
- Bei einigen Proben war keine eindeutige Aussage über den Korrosionszustand der Bewehrung möglich, weil entweder der Riß nicht bis zur Bewehrung durchdrang, die Korrosion keinen eindeutigen Bezug zum Rißbereich zeigte oder die Probe beim Bohren zerstört wurde und im Nachhinein keine eindeutige Aussage über den Korrosionszustand der Bewehrung im Rißbereich mehr möglich war.

Tabelle 9: Korrosionserscheinungen der Stahlbewehrung der Proben mit eingepprägten Trennrissen im Rißbereich. O-keine Korrosion; X-Flugrost; XX-Korrosionsnarben, ?-keine Aussage möglich

Betonüberdeckung Rißbreite		2 cm klein	5 cm klein	2 cm groß	5 cm groß
Proben- position	Einlagerungsdauer Rißbreite				
1 O ₂ - arm	17 Monate	X	?	XX	X
	47 Monate	XX	X	?	XX
	max. Rißbreite in mm	0,25	0,25	0,4	1,0
2 O ₂ - reich	17 Monate	?	?	X	?
	47 Monate	XX	0	?	XX
	max. Rißbreite in mm	0,15	0,2	0,55	0,7
3 O ₂ - reich	17 Monate	X	X	?	X
	47 Monate	0-X	X	XX	?
	max. Rißbreite in mm	0,15	0,2	0,45	0,6
4 O ₂ - reich	17 Monate	?	?	?	?
	47 Monate	XX	X	?	?
	max. Rißbreite in mm	0,2	0,25	0,7	0,6
5 O ₂ - reich	17 Monate	XX	0	?	XX
	47 Monate	XX	0	XX	?
	max. Rißbreite in mm	0,2	0,2	1,0	0,6
6 O ₂ - reich	17 Monate	XX	X	XX	X
	47 Monate	XX	X	XX	XX
	max. Rißbreite in mm	0,3	0,3	0,6	0,6

Die Abb. 25 und 26 zeigen beispielhaft einige der untersuchten Stähle.

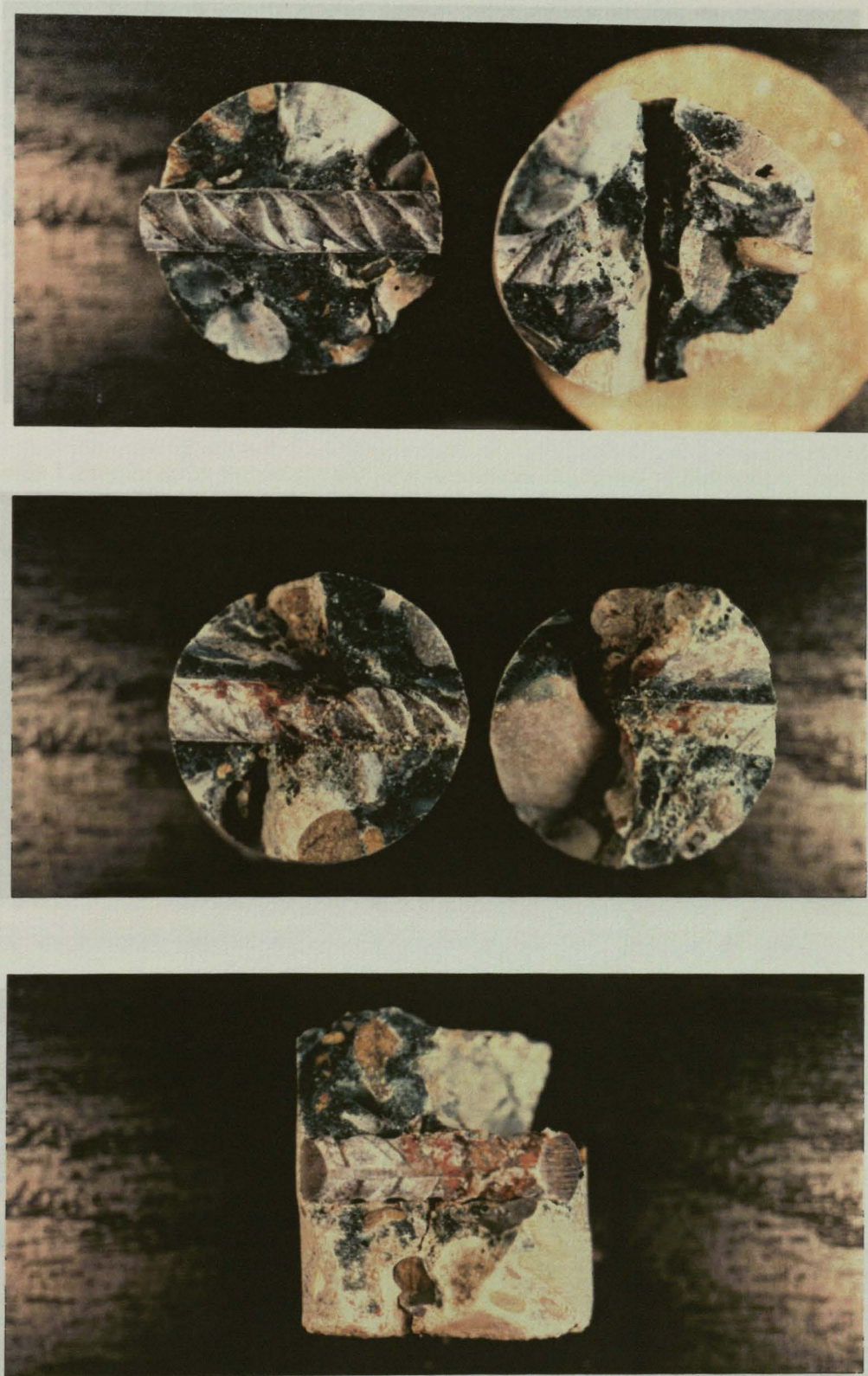


Abb. 25: Korrosionserscheinungen an der Bewehrung der Stahlbetonkörper mit Trennriß im Rißbereich. Oben: Probe 7.3.90-3, Kennzeichnung 0 - keine Korrosion. Mitte: Probe 7.3.90-7, Kennzeichnung X - Flugrost. Unten: Probe 9.2.90-1, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben.

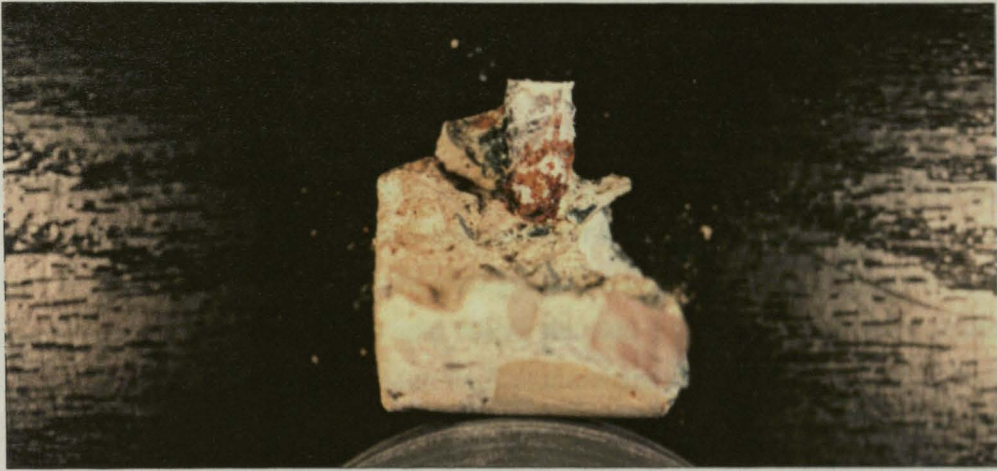
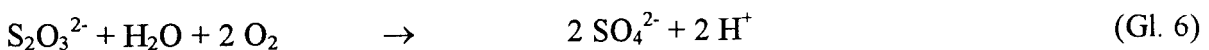
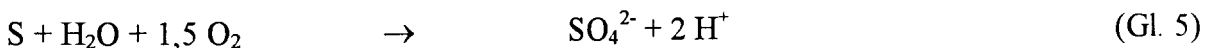
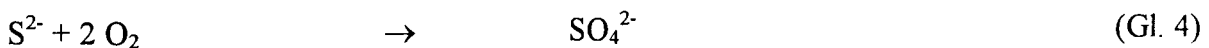


Abb. 26: Korrosionserscheinungen an der Bewehrung der Stahlbetonkörper mit Trennriß im Rißbereich. Oben: Probe 9.2.90-4, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben. Mitte: Probe 9.2.90-4, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben. Unten: Probe 28.3.90-7, Kennzeichnung XX - Korrosionsnarben.

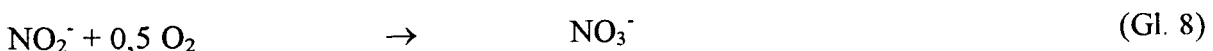
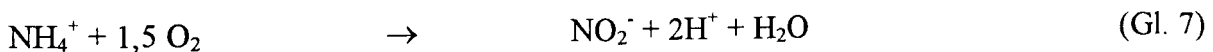
6.7 Mikrobiologische Untersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden mikrobiologische Untersuchungen zur Betonkorrosion in den Belebungsbecken durchgeführt. Die mikrobielle Besiedlung des Belebtschlammes und der mit dem Abwasser beaufschlagten Stahlbetonproben wurde nach 17- bzw. 47-monatiger Einlagerungsdauer der Betonproben in dem Belebungsbecken fünf untersucht. Daneben wurden weitere Betonproben aus einem der älteren und einem der neu erstellten Belebungsbecken entnommen. Die mikrobiologische Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig (Prof. Hanert) durchgeführt. Sie werden im Detail in den Arbeiten /23,24/ beschrieben, aus dem große Teile dieses Kapitels übernommen wurden.

Die mikrobielle Untersuchung konzentrierte sich im wesentlichen auf Thiobacillen und Nitrifizierer. Dies sind säureproduzierende, aerobe, chemolithoautotrophe Bakterien, die hauptsächlich für den biologischen Angriff auf Betonbauwerke verantwortlich gemacht werden. Thiobacillen oxidieren verschiedene, reduzierte Schwefelverbindungen zu Sulfat. Man kann sie, in Abhängigkeit von dem pH-Wert, bei dem sie wachsen, in zwei große Gruppen unterteilen: neutrophile und acidophile Thiobacillen. Die mögliche Spannweite des pH-Wertes reicht nach Schlegel /19/ vom pH 2 bis pH 8. Thiobacillen können damit weder uncarbonatisierten Beton (hochalkalisch), noch carbonatisierten Beton unmittelbar besiedeln (pH-Wert ca. 8,5). Erst wenn der pH-Wert der Betonoberfläche durch die Tätigkeit anderer Mikroorganismen weiter absinkt, beginnt die Besiedlung mit Thiobacillen. Die betonkorrosive Wirkung der Thiobacillen liegt in der Säureproduktion und der Bildung von Sulfat. Nach Schlegel /19/ kann der Prozeß über folgende Gleichungen zusammengefaßt werden (verschiedene Thiobacillusarten mit unterschiedlichen Schwefelquellen):



Nitrifizierer oxidieren zum Energiegewinn Stickstoffverbindungen. Man unterscheidet dabei zwei Stufen der Nitrifikation: In der ersten Stufe oxidieren Ammoniumoxidierer Ammonium zu Nitrit, in der zweiten Stufe wird dieses von Nitritoxidierern zu Nitrat weiteroxidiert:



Alle bei diesem Prozeß beteiligten Stoffe (Ammonium, Nitrit, Nitrat, Salpetersäure) können einen lösenden Angriff auslösen bzw. korrosiv auf die Bewehrung von Stahlbeton einwirken. Nitrifizierer wachsen im pH-Wert-Bereich von 7-8 optimal. Da sie Salpetersäure produzieren, benötigen sie als umgebendes Medium ein neutrales bis leicht alkalisches Material mit ausreichender Pufferkapazität, z.B. carbonatisierten Beton.

Daneben wurde auch die Keimzahl aerober, organotropher Mikroorganismen („Gesamtkeimzahl“) ermittelt. Im Hinblick auf die verwendeten Medien, Kulturbedingungen und die Bestimmung der Keimzahlen (MPN-Methode) wird auf /23,24/ verwiesen.

6.7.1 Charakterisierung des Abwassers

Die folgenden Tabellen zeigen den Sauerstoffgehalt und den pH-Wert des Abwassers gemessen in einer sauerstoffreichen (Probenposition 4) und einer sauerstoffarmen Zone (Probenposition 1) sowie die ermittelten Keimzahlen im Belebtschlamm. Die Daten wurden jeweils an den Positionen im Belebungsbecken ermittelt, an denen sich auch die danach beproben Betonkörper befanden. Der pH-Wert wurde mit einem pH-Meter Metrohm E512 und einer Elektrode Ingold 405 ermittelt. Der Sauerstoffgehalt wurde 10 cm unterhalb der Wasseroberfläche mit einem Sauerstoffmeßgerät WTW Oxi 196 und einer Elektrode WTW Oxical S gemessen. Die Trockengewichtsbestimmung des Klärschlammes erfolgte durch Trocknen bei 105°C. Die Proben wurden nach DIN 38414 Teil 2 Abs. 7.2 /N6/ vorbehandelt.

Tab. 10: Sauerstoffgehalt im Abwasser (Belebungsbecken).

	10.9.92	11.7.95
sauerstoffreiche Zone	4,8 mg/l	6,6 mg/l
sauerstoffarme Zone	0,4 mg/l	0,4 mg/l

Tab. 11: pH-Wert des Abwassers.

	10.9.92	11.7.95
sauerstoffreiche Zone	7,3	7,4
sauerstoffarme Zone	7,2	7,3

Die Meßdaten zeigen keinen wesentlichen Unterschied im pH-Wert und im Sauerstoffgehalt zu den beiden Zeitpunkten der Beprobung. Der Sauerstoffgehalt der O₂-reichen Zone hängt vom momentanen Betriebszustand der Rotoren ab.

Tab. 12: Übersicht über die Keimzahlen im Belebtschlamm (Angaben pro g Trockensubstanz).

		10.9.1992	11.7.1995
sauerstoff-reich	aerobe, organotrophe Mikroorganismen	$2,6 \cdot 10^{10}$	$6,8 \cdot 10^8$
	neutrophile Thiobacillen	$4,6 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^5$
	acidophile Thiobacillen	$4,6 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$
	Nitrifizierer 1. Stufe	$4,6 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^6$
	Nitrifizierer 2. Stufe	$4,6 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^5$
sauerstoff-arm	aerobe, organotrophe Mikroorganismen	$2,6 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$
	neutrophile Thiobacillen	$2,3 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^5$
	acidophile Thiobacillen	$4,1 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$
	Nitrifizierer 1. Stufe	$1,4 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$
	Nitrifizierer 2. Stufe	$4,1 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$

Die Unterschiede zwischen den beiden Meßzeitpunkten in den Keimzahlen der Thiobacillen und Nitrifikanten sind nur unbedeutend. Die Anzahl aerober, organotropher Mikroorganismen war im sauerstoffreichen Teil des Belebungsbeckens 1992 höher als in 1995.

6.7.2 Untersuchung der Betonproben - Einleitung

Untersucht wurden zu jedem Prüftermin Betonproben die an den Probenpositionen 1 (sauerstoffarm) und 4 (sauerstoffreich) eingelagert waren (siehe Abb. 4) sowie zum Vergleich ein Betonkörper, der auf dem Gelände des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz atmosphärisch bewittert wurde (Blindprobe). Nach dem Herausziehen der Betonkörper aus dem Belebungsbecken wurden diese mit einem Wasserstrahl kalt gereinigt. Anschließend wurden Bohrkerne mit 5 cm Durchmesser naß aus den Betonproben ausgebohrt. Die jeweils entnommenen Doppelproben wurden später als Mischprobe aufgearbeitet. Zum ersten Prüftermin wurde außerdem ein Bohrkern aus dem älteren Belebungsbecken 2 untersucht. Der Beton dieses Belebungsbeckens zeigte starke Schäden (Abplatzungen, Schalenbildung) und war mit einem Schutzanstrich versehen, der zum Zeitpunkt der Probennahme jedoch weitgehend zerstört war. Zum zweiten Prüftermin wurde zusätzlich noch eine Probe einer horizontalen Beckenwandoberfläche entnommen. Diese leicht korrodierte Oberfläche zeigte ein Zurücktreten des Bindemittels gegenüber dem Zuschlag. Die entnommenen Bohrkerne wurden in Scheiben zersägt. Diese wurden mit Hilfe eines Stahlmörser zerkleinert und auf ein 1 mm Sieb gegeben. Jeweils 1 g des Siebdurchgangs wurde in 99 ml Leitungswasser 15 min bei 100 Upm über Kopf geschüttelt. Diese Suspensionen wurden dann zur Keimzahlbestimmung herangezogen. Alle Keimzahlangaben pro g Trockenmasse beziehen sich auf eine Trocknungstemperatur von 105°C.

Eine gewisse Verfälschung der Keimzahlen durch die Probenaufbereitung kann nicht völlig ausgeschlossen werden. Durch das Bohren und Sägen unter Fließwasser können Keime ausgewaschen werden. Durch die nicht sterilen Maschinen (die jedoch zwischen den verschiedenen Einsätzen völlig austrocknen) können auch Zellen eingetragen werden. Dies wird jedoch vor allem die „Gesamtkeimzahl“ verfälschen, da für die Thiobacillen und Nitrifizierer auf den Maschinen keine ausreichende Versorgung gegeben ist.

Die Beprobung der Betonproben erfolgte in der Regel von oben. Die Oberseite der Proben ragte einige Zentimeter aus der Flüssigkeit heraus, war jedoch im Falle der Proben aus dem sauerstoffreichen Bereich völlig mit Belebtschlamm bedeckt. In der sauerstoffarmen Zone erfolgte die Beprobung im Bereich der Abwasseroberfläche. Dort stehen sowohl Sulfid als auch Sauerstoff aus der Luft zur Verfügung, was zu einer erhöhten Gefährdung des Betons durch Thiobacillen führen kann, die mit den dort vorhandenen Desulfurizierern in einer Symbiose leben können und das von ihnen produzierte Sulfid zu Sulfat oxidieren.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die entnommenen Proben. Im Jahr 1995 wurde eine engere Schichtenverteilung gewählt, da sich 1992 herausgestellt hatte, daß in der Schicht von 1,5 bis 2,5 cm keine für Biodeterioration verantwortlichen Mikroorganismen mehr nachzuweisen waren.

Tab. 13: Proben für die Untersuchung der mikrobiellen Besiedlung des Betons (aus /23,24/).

Probenbezeichnung	Entnahmetiefe in cm Proben 1992	Entnahmetiefe in cm Proben 1995	Herkunft
1/92 1/95 2/95 2/92 3/92	0,0-0,5 1,5-2,5 4,0-5,0	 0,0-0,5 0,5-1,5	sauerstoffreicher Bereich
4/92 3/95 4/95 5/92 6/92	0,0-0,5 1,5-2,5 4,0-5,0	 0,0-0,5 0,5-1,5	sauerstoffarmer Bereich
7/92 5/95 6/95 8/92 9/92	0,0-0,5 1,5-2,5 4,0-5,0	 0,0-0,5 0,5-1,5	Blindprobe atmosphärisch bewittert
10a/92 11/92 12/92 10b/92 (Schutzanstrich)	0,2-0,7 1,5-2,5 4,0-5,0 0,0-0,2		altes Belebungsbecken oberhalb der Wasserlinie
7/95		0,0-0,7	Beckenwand ca. 1,1 m oberhalb der Wasserlinie

6.7.3 Untersuchung der Betonproben - Keimzahlen

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Bestimmungen von Keimzahlen.

Tab. 14: Keimzahlen der Betonproben (n.n. nicht nachweisbar, alle Angaben pro g Trockensubstanz Beton, aus /23,24/).

	Zone	Tiefe in cm	„Gesamt- keimzahl“	Thiobacillen		Nitrifizierer	
				neutrophil	acidophil	1. Stufe	2. Stufe
1995	O ₂ -reich	0-0,5	$7,5 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^2$	$5,4 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$
		0,5-1,5	$1,6 \cdot 10^3$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	O ₂ -arm	0-0,5	$7,5 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$
		0,5-1,5	$8,6 \cdot 10^3$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Kontrolle	0-0,5	$2,7 \cdot 10^5$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		0,5-1,5	$4,9 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Wandkrone	0-0,7	$2,6 \cdot 10^7$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1992	O ₂ -reich	0-0,5	$2,8 \cdot 10^6$	$8,5 \cdot 10^2$	n.n.	$1,0 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$
		1,5-2,5	$2,8 \cdot 10^3$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		4,0-5,0	$2,7 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	O ₂ -arm	0-0,5	$5,7 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	$2,8 \cdot 10^2$
		1,5-2,5	$1,0 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		4,0-5,0	$2,7 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	Kontrolle	0-0,5	$2,6 \cdot 10^3$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		1,5-2,5	$2,6 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		4,0-5,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	altes Becken	0,2-0,7	$1,0 \cdot 10^8$	$2,8 \cdot 10^2$	n.n.	$5,0 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^5$
		1,5-2,5	$2,8 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		4,0-5,0	$2,8 \cdot 10^2$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
		0,0-0,2 Anstrich	$2,5 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^3$	n.n.	$2,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^5$

Zum besseren Vergleich sind die Daten in den Abb. 27 bis 32 graphisch dargestellt. Abb. 27 zeigt die Anzahl aerober, organotropher Mikroorganismen in 0-0,5 cm Tiefe. Sie hat sich im Untersuchungszeitraum kaum verändert. Signifikante Unterschiede zwischen der sauerstoffreichen und -armen Zone sind nicht zu erkennen. Erstaunlich ist, daß in der die Beckenwandprobe, die nicht in unmittelbaren Kontakt zum Abwasser stand, eine ähnlich hohe Keimzahl gefunden wurde wie in den mit Abwasser beaufschlagten Proben. Die Besiedlung der Betonporen erfolgt offensichtlich auch über die Luft, bzw. über die Aerosole, die durch die Rotoren freigesetzt werden. Interessant ist auch die Zunahme der Keimzahl in der atmosphärisch bewitterten Blindprobe. Möglicherweise wird sich die Anzahl aerober, organotropher Mikroorganismen im Oberflächenbereich dieses Betons im Laufe der nächsten Jahre sogar auf ein Niveau erhöhen, das den mit Abwasser beaufschlagten Proben entspricht. Die Besiedlung würde dann hier lediglich langsamer erfolgen.

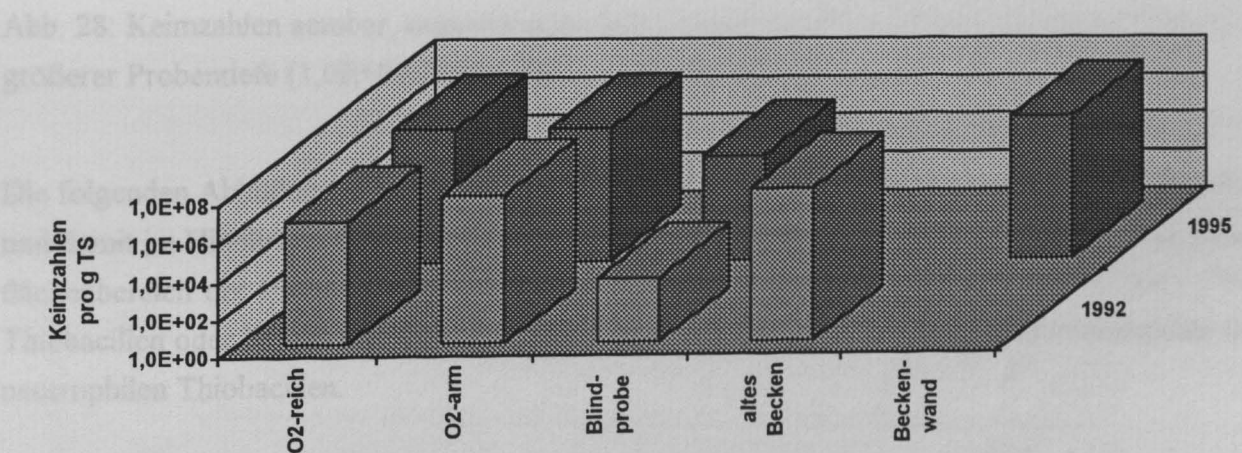


Abb. 27: Keimzahlen aerober organotropher Mikroorganismen pro g Trockensubstanz (Beton) in 0-0,5 cm Tiefe.

Abb. 28 zeigt die Keimzahlen aerober, organotropher Mikroorganismen in größerer Probentiefe. Sie sind geringer als die entsprechenden Keimzahlen der Oberflächenproben. In der Blindprobe wurden in 4,0 bis 5,0 cm Tiefe keine aeroben, organotrophen Mikroorganismen nachgewiesen. Dies deutet darauf hin, daß die dargestellten Keimzahlen nicht auf eine unsterile Probennahme und -zerkleinerung zurückzuführen sind.

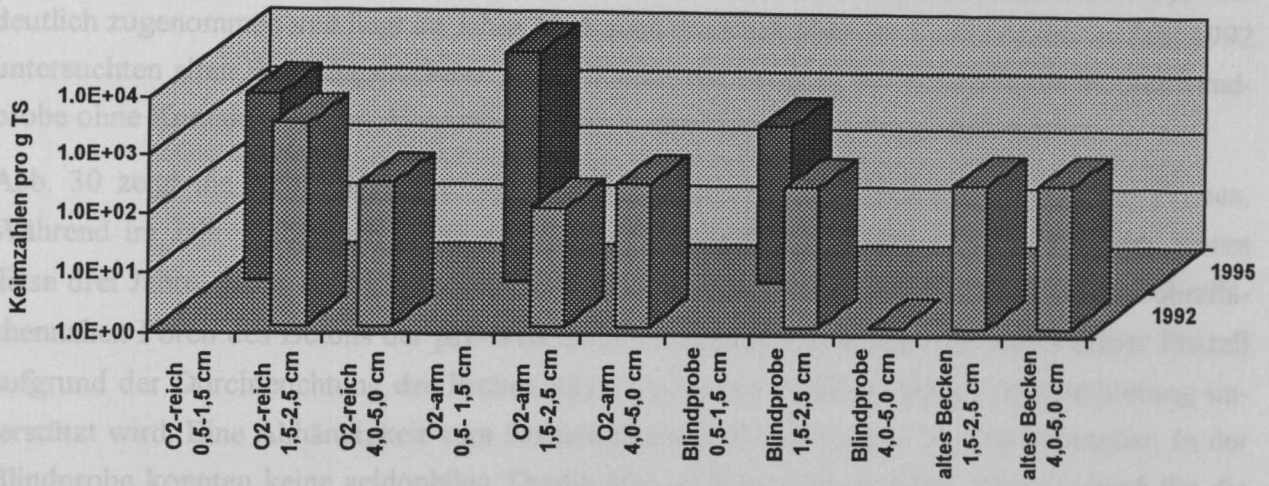


Abb. 28: Keimzahlen aerober, organotropher Mikroorganismen pro g Trockensubstanz (Beton) in größerer Probentiefe (1,0E+00 - keine Zellen nachweisbar).

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die Keimzahlen der säureproduzierenden, und damit im Hinblick auf die Betonkorrosion besonders interessanten Mikroorganismen im Oberflächenbereich der Proben (0-0,5 cm Tiefe). In größerer Tiefe konnten weder 1992 noch 1995 Thiobacillen oder Nitrifikanten nachgewiesen werden. Abb. 29 zeigt zunächst die Keimzahlen der neutrophilen Thiobacillen.

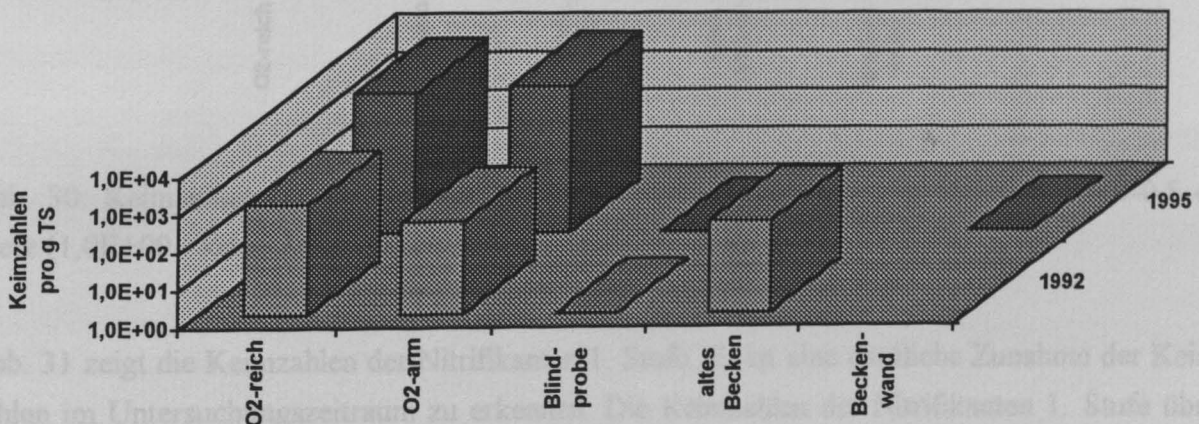


Abb. 29: Keimzahlen der neutrophilen Thiobacillen pro g Trockensubstanz (Beton) in 0-0,5 cm Tiefe (1,0E+00 - keine Zellen nachweisbar).

Ein deutlicher Einfluß des Sauerstoffgehaltes auf die Keimzahlen neutrophilen Thiobacillen ist nicht erkennbar. Die Anzahl der neutrophilen Thiobacillen hat im Untersuchungszeitraum jedoch deutlich zugenommen und liegt im Jahre 1995 auch erheblich über der Keimzahl des im Jahr 1992 untersuchten alten Belebungsbeckens. In der Blindprobe sowie in der geschädigten Beckenwandprobe ohne Kontakt mit dem Abwasser konnten keine Thiobacillen festgestellt werden.

Abb. 30 zeigt die Keimzahlen der acidophilen Thiobacillen im Oberflächenbereich der Proben. Während im Jahr 1992 noch keine acidophilen Thiobacillen analysiert werden konnten, waren diese drei Jahre später deutlich nachweisbar. Dies ist ein Hinweis darauf, daß in einigen oberflächennahen Poren des Betons der pH-Wert bereits erheblich abgesunken ist, wobei dieser Prozeß aufgrund der Durchfeuchtung der Proben kaum durch eine fortschreitende Carbonatisierung unterstützt wird. Eine Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt des Abwassers ist nicht erkennbar. In der Blindprobe konnten keine acidophilen Thiobacillen nachgewiesen werden. Dies gilt auch für die nicht beaufschlagte Probe aus der Beckenwand und die im Jahre 1992 untersuchte Probe des alten, noch nicht sanierten Belebungsbeckens.

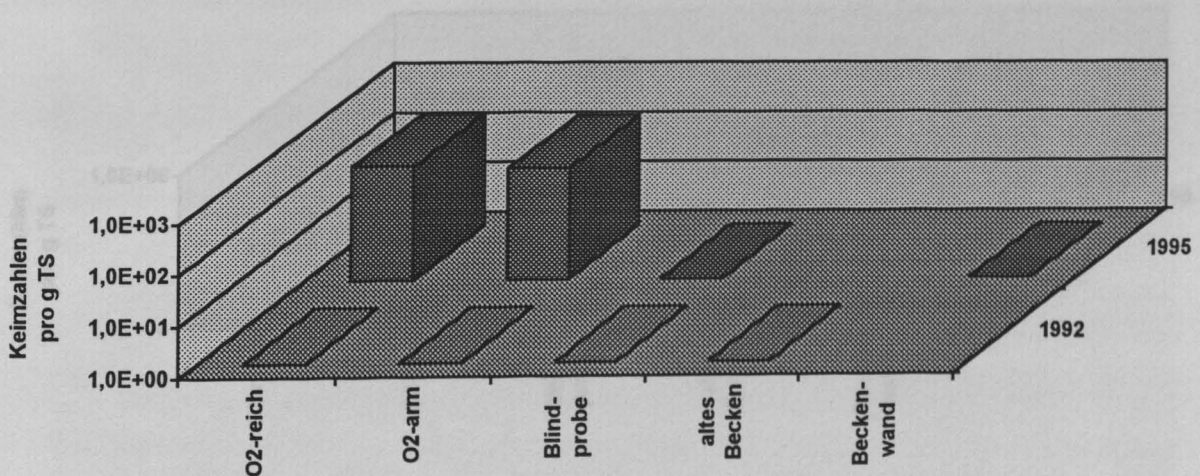


Abb. 30: Keimzahlen der acidophilen Thiobacillen pro g Trockensubstanz (Beton) in 0-0,5 cm Tiefe (1,0E+00 - keine Zellen nachweisbar).

Abb. 31 zeigt die Keimzahlen der Nitrifikanten 1. Stufe. Es ist eine deutliche Zunahme der Keimzahlen im Untersuchungszeitraum zu erkennen. Die Keimzahlen der Nitrifikanten 1. Stufe übersteigen 1995 die 1992 am alten Belebungsbecken gemessenen Werte. In der Blindprobe sowie in der Probe aus der nicht beaufschlagten Beckenwand waren keine Nitrifikanten nachweisbar.

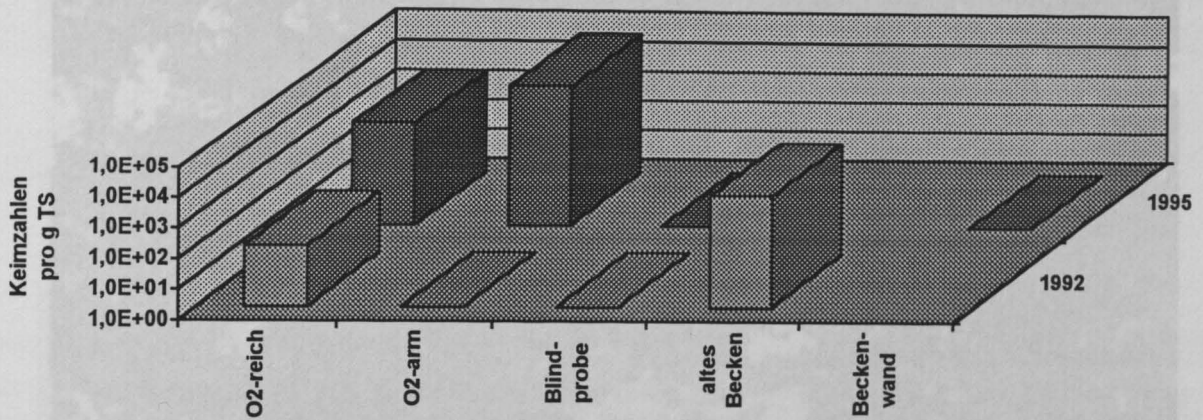


Abb. 31: Keimzahlen der Nitrifikanten 1. Stufe pro g Trockensubstanz (Beton) in 0-0,5 cm Tiefe (1,0E+00 - keine Zellen nachweisbar).

Abb. 32 zeigt die Keimzahlen der Nitrifikanten 2. Stufe. Auch in diesem Fall ist eine deutliche Zunahme der Keimzahlen im Untersuchungszeitraum zu erkennen.

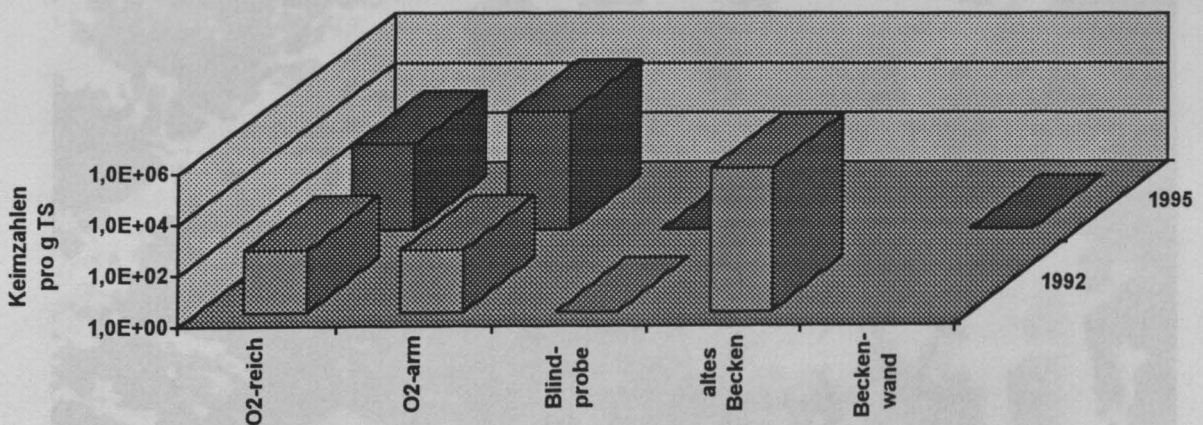


Abb. 32: Keimzahlen der Nitrifikanten 2. Stufe pro g Trockensubstanz (Beton) in 0-0,5 cm Tiefe (1,0E+00 - keine Zellen nachweisbar).

6.7.4 Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop

1992 konnten mit dem Rasterelektronenmikroskop auf der Betonoberfläche Mikroorganismen beobachtet werden. 1995 war dies auch in größerer Tiefe (0,5-1,5 cm) möglich. Die Besiedlung des Betons durch Mikroorganismen hat sich während des Untersuchungszeitraums also deutlich erhöht. 1992 waren in solcher Tiefe nur in dem Beton des alten Belebungsbeckens Mikroorganismen nachweisbar. Die folgenden Abbildungen zeigen die beobachteten Strukturen.

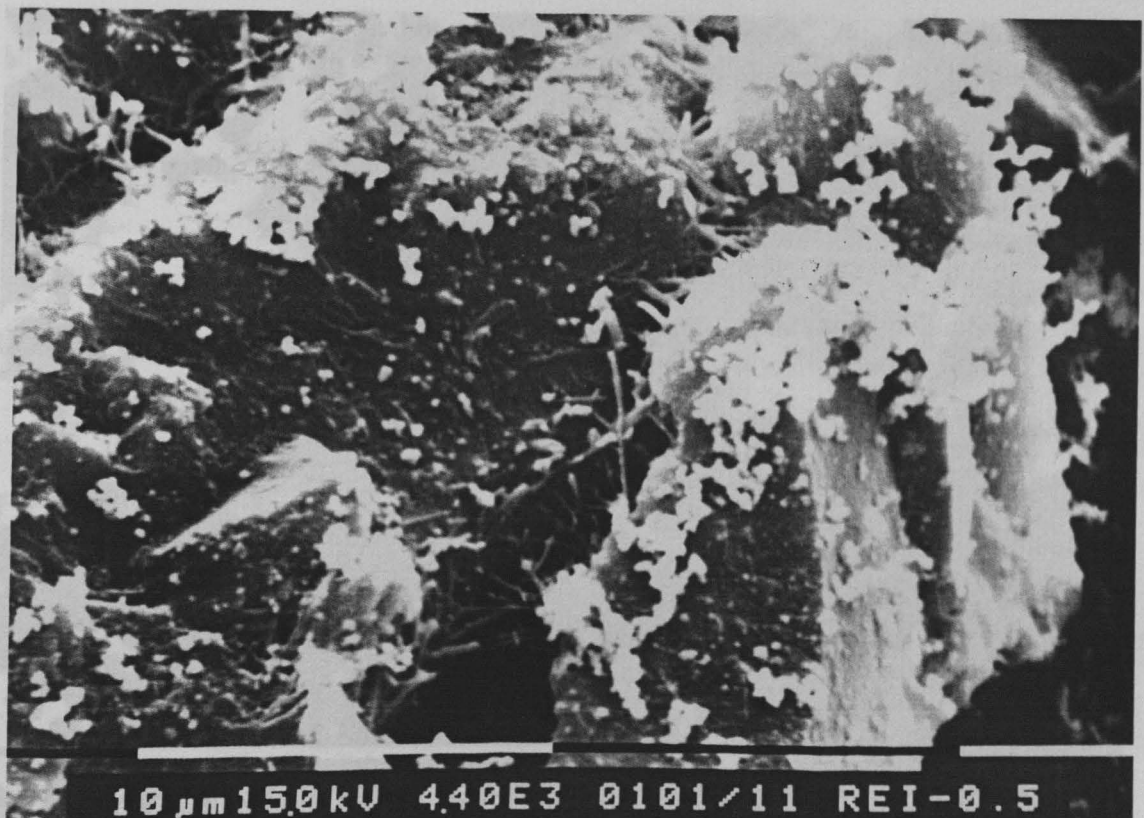
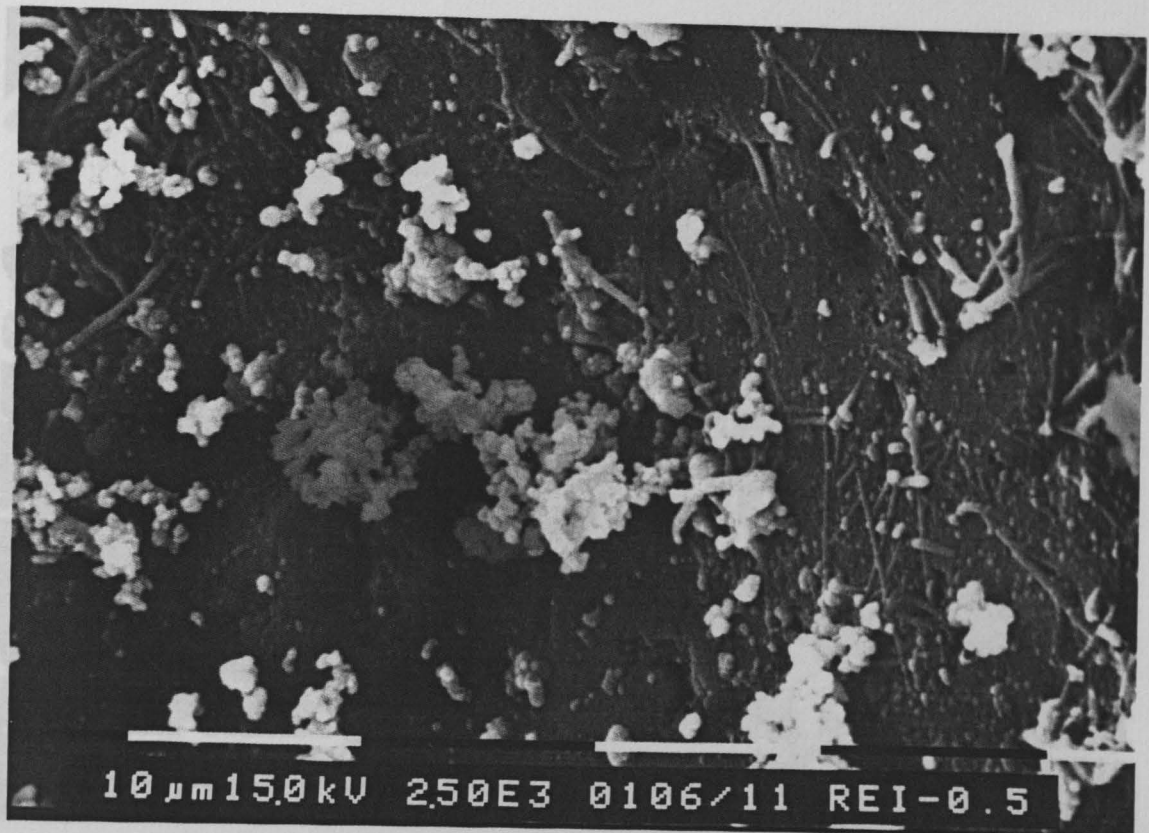


Abb. 33: Oben: Stäbchenförmige Bakterien und ihre Schleimspuren. Probe aus der sauerstoffreichen Zone, 0,0-0,5 cm Tiefe, 1995, 2500fache Vergrößerung. Unten: Fädige biologische Strukturen. Probe aus der sauerstoffreichen Zone, 0,0-0,5 cm Tiefe, 1995, 4400fache Vergrößerung (aus /24/).

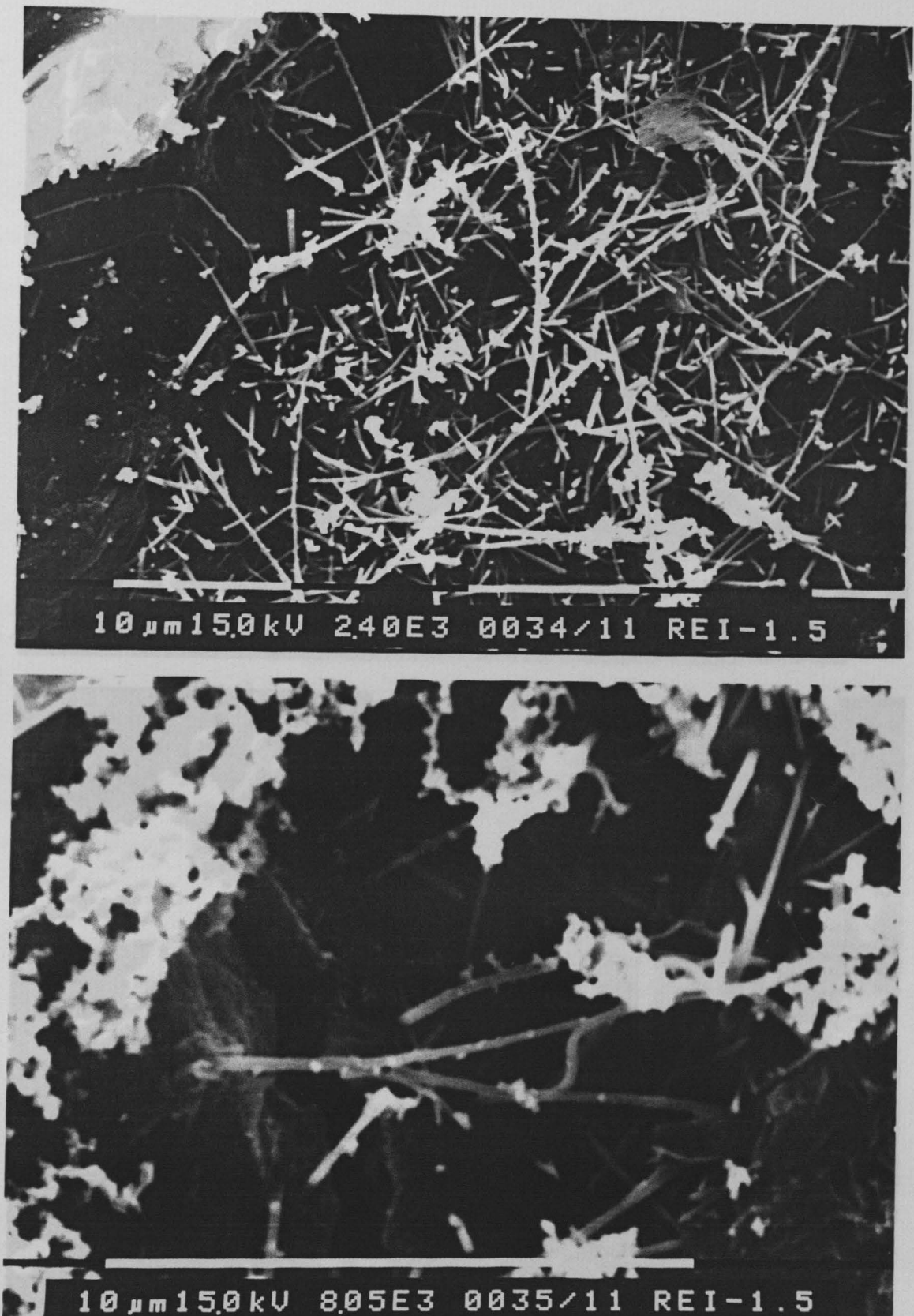


Abb. 34: Oben: Biologische Strukturen aus größerer Entnahmetiefe. Probe aus der sauerstoffreichen Zone, 0,5-1,5 cm Tiefe, 1995, 2400fache Vergrößerung. Unten: Fädige Strukturen bilden einen Biofilm. Probe aus der sauerstoffreichen Zone, 0,5-1,5 cm Tiefe, 1995, 8500fache Vergrößerung (aus /24/).

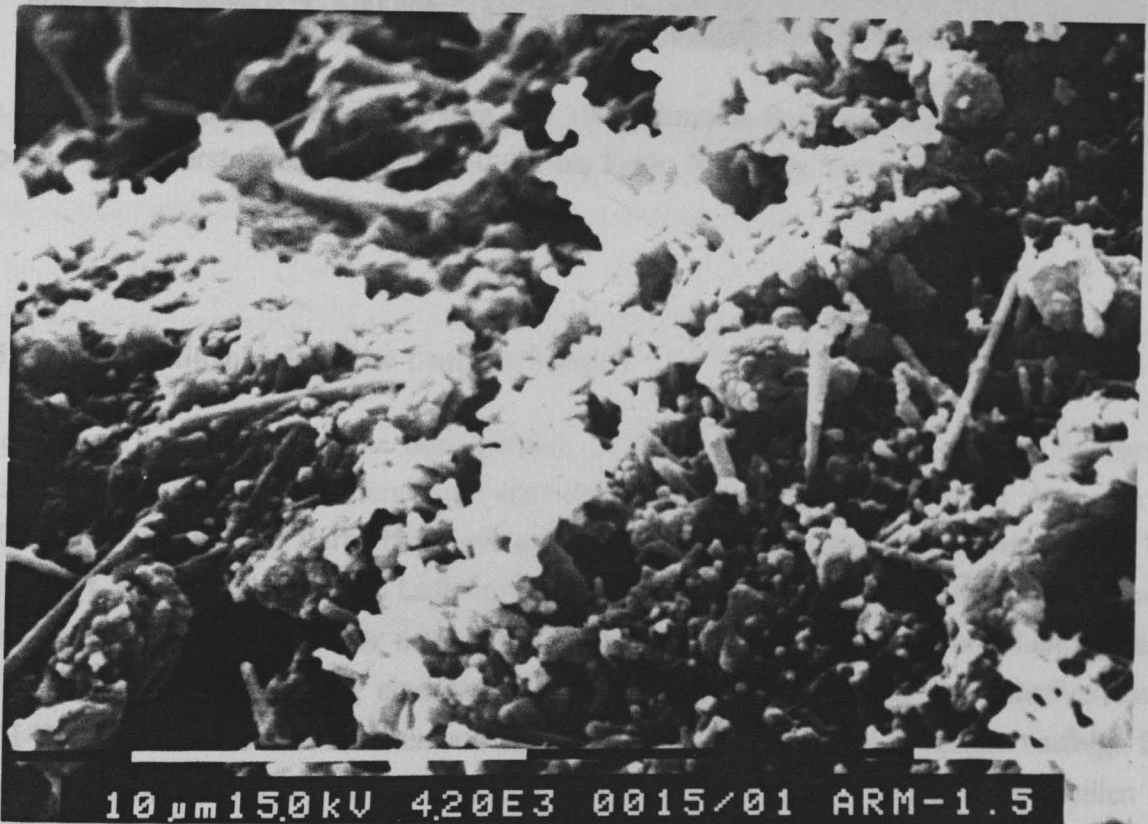
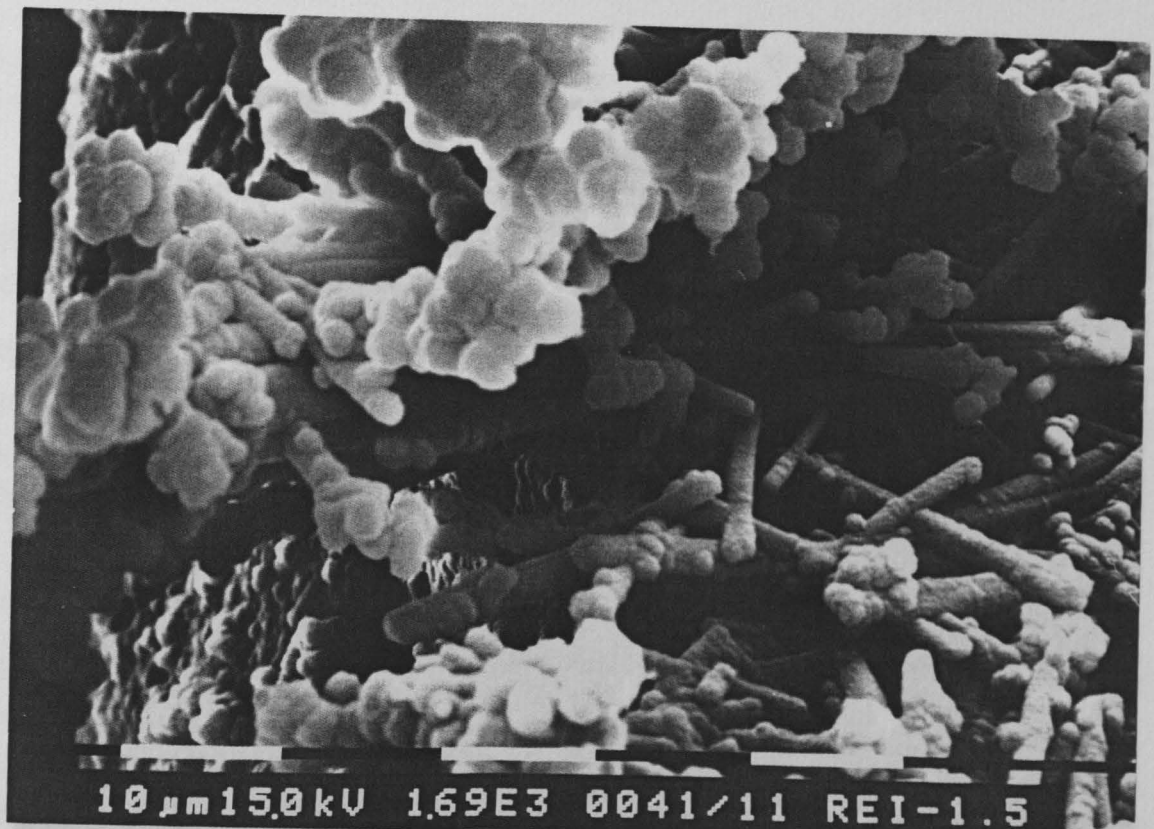


Abb. 35: Oben: Lange stäbchenförmige Zellen und ihre Ausscheidungsprodukte. Probe aus der sauerstoffreichen Zone, 0,5-1,5 cm Tiefe, 1995, 1690fache Vergrößerung. Unten: Ähnliche Bakterien im Biofilm. Probe aus der sauerstoffarmen Zone, 0,5-1,5 cm Tiefe, 1995, 4300fache Vergrößerung (aus /24/).

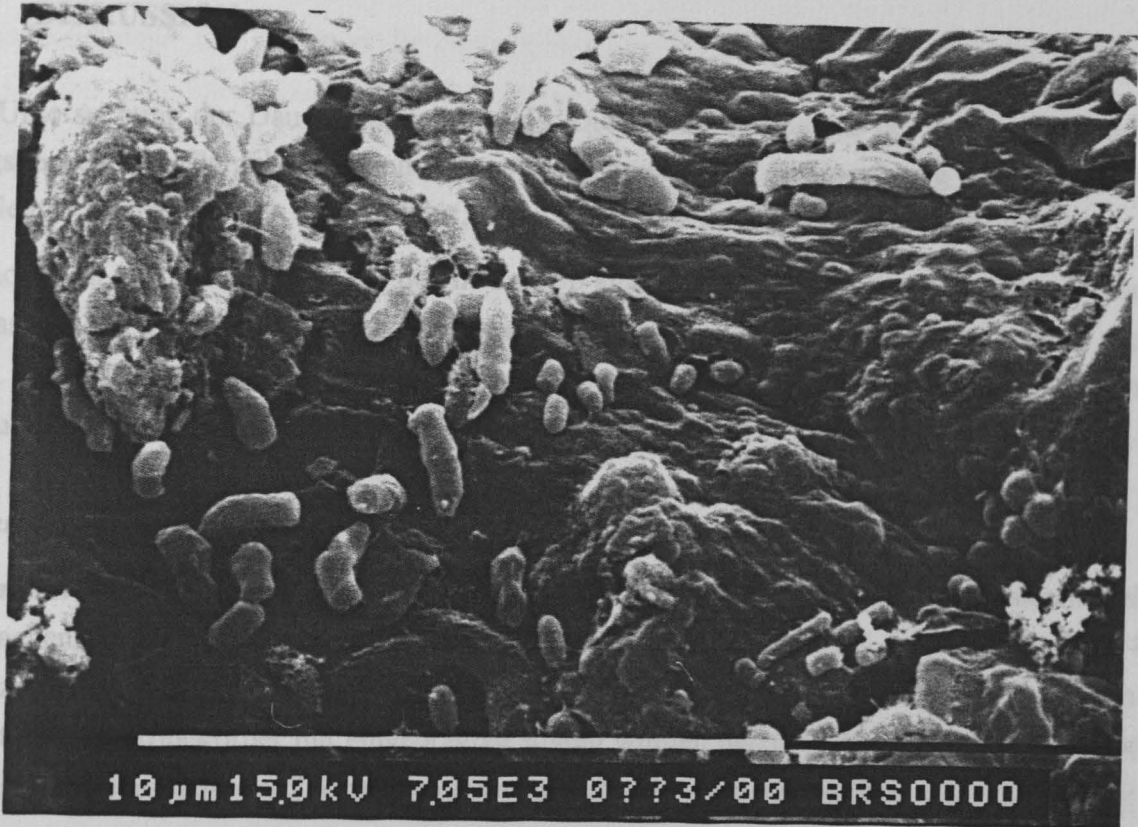


Abb. 36: Zum Vergleich ein Bild aus dem Jahr 1992. Einzelne Bakterien auf der Betonoberfläche. Probe aus der sauerstoffreichen Zone, 0,0-0,5 cm Tiefe, 7050fache Vergrößerung (aus /24/).

6.7.5 Weitere mikrobiologische Untersuchungen

Weiterhin wurden Laborversuche durchgeführt, in denen Probekörper aus reinem Zementstein (gleicher Zement wie auf der Kläranlage) über einen Zeitraum von 2 Monaten mit Abwasser aus der Kläranlage Steinhof in Verbindung gebracht wurden. Das Abwasser wurde zweimal pro Woche erneuert. Durch Einblasen von Luft wurde eine Spritzwasserzone erzeugt. Danach wurden die Zementsteinproben in Medien für neutrophile Thiobacillen bzw. Nitrifizierer und Leitungswasser überführt. Nach der Einstellung einer konstanten Atmungsrate wurde der Sauerstoffverbrauch, der pH-Wert und die Konzentrationen von Sulfat, Nitrit und Nitrat in den Lösungen verfolgt. Diese Versuche zeigten, daß auf der Oberfläche der Zementsteinkörper tatsächlich Thiobacillen und Nitrifizierer angesiedelt wurden. Die Verhältnismerte der gemessenen Parameter stimmten sehr gut mit den entsprechenden Gleichungen 4 bis 8 zur Nitrifikation und Schwefeloxidation überein. Die Säureproduktion der Mikroorganismen sowie die Pufferwirkung des Zementsteins konnten gut verfolgt werden /23/.

7. DISKUSSION

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit und der Dichtigkeit des Betons der neu errichteten Belebungsbecken der Kläranlage Steinhof des Abwasserverbandes Braunschweig wurden langfristig angelegte Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im folgenden diskutiert werden.

Zunächst hat sich gezeigt, daß mit den in Tab. 3b angegebenen Betonrezepturen (ohne Beton mit Flugasche) ein gut verarbeitbarer Beton der angegebenen Konsistenz sicher hergestellt werden kann. Die zulässige Dosierung der Betonzusatzmittel wurde dabei nicht ausgeschöpft. Ein wasserundurchlässiger Beton B 35 konnte zuverlässig erreicht werden.

Dauerhaftigkeit

In den Belebungsbecken der Anlage ist aufgrund des Ammoniumgehaltes im Abwasser mit einem schwachen, im Bereich des Zulaufs auch mit einem starken chemischen Angriff nach DIN 4030 /N5/ zu rechnen. Die im Alter von ca. einem Jahr in das Belebungsbecken der Anlage eingehängten Stahlbetonprobekörper mit eingepprägten Rissen wurden deshalb über einen Zeitraum von ca. vier Jahren insbesondere auf Anzeichen eines lösenden Angriffs untersucht.

Die makroskopische bzw. mikroskopische Untersuchung der Oberfläche der Probekörper mit Trennrissen ergab über den Einlagerungszeitraum keinerlei Anzeichen für einen chemischen Angriff (Herauslösen des Bindemittels, Rißbildungen). Mit dem Phenolphthaleintest konnte am Ende des Einlagerungszeitraums nur eine Dicke der nicht-alkalischen Betonrandzone von maximal 6 mm beobachtet werden. Diese ist auf die Carbonatisierung der Proben vor der Einlagerung in das Belebungsbecken zurückzuführen. Auch die Untersuchung des Phasenbestandes mittels Differentialthermoanalyse/-gravimetrie bzw. Röntgenphasenanalyse ergab keinerlei Hinweise auf einen chemischen Angriff. Dies gilt auch für die beobachteten Veränderungen der Porenradienverteilung, des Wassersaugens und der Gaspermeabilität der oberflächennahen Betonschicht. Auch die senkrechten Wände der neu errichteten Belebungsbecken zeigten keine Anzeichen eines chemischen Angriffs. Allerdings konnte an einigen Stellen der Wandkrone ein schwaches Zurücktreten des Bindemittels gegenüber den Zuschlägen beobachtet werden. Auf diesen Prozess wird weiter unten eingegangen.

Mikrobielle Besiedlung

Nach 17- und 47-monatiger Einlagerungsdauer wurde die mikrobielle Besiedlung der Stahlbetonproben mit eingepprägten Trennrissen untersucht. Innerhalb dieses Zeitraums konnte eine merkliche Zunahme der Besiedlung beobachtet werden. Aus den Keimzahlen aerober organotropher Mikroorganismen („Gesamtkeimzahl“) ist diese Tendenz kaum zu erkennen, insbesondere dadurch, daß bei der ersten Untersuchung keine Schicht aus einer Probentiefe von 0,5 bis 1,5 cm

untersucht wurde. Die Zunahme der Besiedlung war jedoch im Rasterelektronenmikroskop deutlich sichtbar. Ein Schwerpunkt der mikrobiologischen Untersuchungen wurde auf die Ermittlung der Keimzahlen der säureproduzierenden und damit betonaggressiven Thiobacillen und Nitrifikanten gelegt. Diese beiden Bakteriengruppen konnten nur in der oberflächennahen Betonschicht (0 - 0,5 cm Tiefe) nachgewiesen werden. Innerhalb des Einlagerungszeitraums war eine deutliche Zunahme der entsprechenden Keimzahlen zu beobachten. Nach 47 Monaten Beaufschlagungsdauer überschritten die entsprechenden Keimzahlen z.T. deutlich die Werte, die in einer Betonprobe des stark geschädigten alten Belebungsbeckens ermittelt wurden. Dabei ist allerdings zu betonen, daß die Bauschäden am alten Belebungsbecken im wesentlichen auf eine ungenügende Nachbehandlung der Betonoberfläche und auf eine stark streuende und damit an vielen Stellen ungenügende Betondeckung des Stahles zurückzuführen waren (Abplatzungen der Betondeckung).

Das Ziehen von konkreten Schlüssen hinsichtlich einer möglichen Betonkorrosion auf der Grundlage der vorliegenden Keimzahlen gestaltet sich schwierig, da es auf diesem relativ jungen Forschungsgebiet keinerlei Normen und Richtlinien gibt. Vergleicht man die absoluten Keimzahlen sowie die Verhältniswerte von Thiobacillen bzw. Nitrifikanten zu den Keimzahlen aerober organotropher Mikroorganismen mit Daten aus der Literatur /9,12,17/ kommt man zu dem Schluß, daß aufgrund der vorliegenden Keimzahlen wenn, dann nur eine geringe Gefährdung des Bauwerks vorliegt. Allerdings konnten im Oberflächenbereich der Betonproben nach 47 Monaten Einlagerungsdauer acidophile Thiobacillen beobachtet werden. Der zu den acidophilen Arten gehörige *Thiobacillus thiooxidans* wird als ein „Indikatorbakterium“ für Biodeterioration angesehen.

Die leichte Korrosion an den waagrechten, nicht direkt im Kontakt mit dem Abwasser stehenden Wandoberflächen der Belebungsbecken ist nicht auf säureproduzierende Nitrifikanten oder Thiobacillen zurückzuführen. Ob hier eine Schädigung durch andere Mikroorganismen eine Rolle spielt, konnte nicht geklärt werden. Vermutlich sind diese Schäden aber darauf zurückzuführen, daß Abwasser in Form von Aerosolen auf die Wandoberflächen gelangt und dort nicht abfließt, sondern verdunstet. Dadurch kommt es zur Aufkonzentration von Ammonium und einen dadurch hervorgerufenen überwiegend chemischen Angriff.

Zusammenfassend kann aus den mikrobiologischen Untersuchungen der Schluß gezogen werden, daß die mikrobielle Besiedlung von Betonoberflächen in Kläranlagen durch die Betonqualität anscheinend nicht wesentlich beeinflusst werden kann. Trotz der vorliegenden Besiedlung auch in einer Tiefe von mehreren Zentimetern und dem Auftreten acidophiler Thiobacillen zeigten die in das Abwasser eingelagerten Betonproben keinerlei Anzeichen für einen Säureangriff. Insofern können die wiedergegebenen Keimzahlen bzw. Keimzahlverhältnisse als unkritisch angesehen werden (in /23,24/ wird die Gefährdung des Betons z.T. etwas kritischer gesehen).

Betondeckung, Rißbreiten und Korrossion der Bewehrung

Die Untersuchung hat gezeigt, daß in Belebungsbecken einer entsprechenden Kläranlage eine zulässige Rißbreite von 0,15 mm, wie sie z.B. auch in /2/ empfohlen wird, nicht überschritten werden sollte. Mit den in DIN 1045 /N3/ angegebenen Maßen der Betondeckung, in diesem Fall $\min c = 4$ cm aufgrund des starken chemischen Angriffs nach DIN 4030 /N5/, kann eine Korrosion der Bewehrung sicher ausgeschlossen werden. Anzeichen dafür, daß diese Anforderungen an die Betondeckung und die zulässige Rißbreite zu hoch sind, ergaben sich jedoch nicht. Die Verwendung eines NW Zementes zur Verminderung von Temperaturrissen und das nachträgliche Verschließen der aufgetretenen Risse in den Erweiterungsbauten der Kläranlage war nach den Ergebnissen der Korrosionsuntersuchungen vollauf gerechtfertigt. Analysen der Betonproben auf Chlorid und Gesamt-Stickstoff ließen keinen korrosionsverstärkenden Einfluß von Chloridionen bzw. Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit) auf die Bewehrung erwarten.

Dichtigkeit des Betons

Sowohl die Analysen der Betonporosität und der Porenstruktur mit dem Quecksilberdruckporosimeter als auch die Untersuchungen mit den beiden Bauwerksverfahren zur Messung des Wasser-saugens und der Gaspermeabilität zeigten, daß es sich bei dem untersuchten Beton um einen qualitativ hochwertigen, sehr dichten Beton handelt. Die Erfahrung zeigt außerdem, daß Betone, die mit Wasser in Berührung kommen mit der Zeit immer dichter werden, kleine Risse zeigen einen Selbstheilungseffekt. Dieses Verhalten tritt allerdings nur dann auf, wenn das anstehende Medium keinen chemischen Angriff auf den Beton ausübt. Die zeitabhängige Messung der genannten Parameter ergab jedoch, daß dies hier nicht der Fall war. Die Dichtigkeit des Betons hat in den ersten beiden Jahren der Beaufschlagung zugenommen und ist danach etwa konstant geblieben. Nach zwei Jahren war das mögliche Potential der Nachhydratation offensichtlich erschöpft. Eine Gefährdung für die Dichtigkeit des Betons ist nach diesen Ergebnissen nicht gegeben.

Sollen die Dichtigkeitseigenschaften quantifiziert werden, können dazu die experimentell ermittelten Gaspermeabilitätskoeffizienten herangezogen werden (s.S. 41-43). Die Permeabilität für Wasser kann für den nacherhärteten Beton etwa mit $2,5 \cdot 10^{-14}$ m/s angesetzt werden (zusammengestellt unter Verwendung von /1,8,25/). Zum Vergleich: dieser Wert ist um Zehnerpotenzen kleiner als die Anforderungen an Kombinationsdichtungen für den Deponiebau. Reine Tone zeigen Durchlässigkeitsbeiwerte für Wasser von 10^{-9} bis 10^{-11} m/s. Diese Dichtigkeit des Betons kann jedoch nur im ungerissenen Bauteilquerschnitt angesetzt werden. Außerdem ist die Problematik der Fugendichtigkeit zu berücksichtigen, die in diesem Forschungsprojekt nicht behandelt wurde. Für diffusive Transportvorgänge gelöster Teilchen kann nach /16,22/ ein mittlerer Diffusionskoeffizient von ca. $0,5 \cdot 10^{-12}$ m²/s angesetzt werden.

8. LITERATUR

- /N1/ British Standards Institution: BS 1881, Methods for testing concrete, pt. 5 (1970)
- /N2/ DIN V ENV 206: Beton Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis. Beuth Verlag, Berlin (1990)
- /N3/ DIN 1045: Beton und Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin (1988)
- /N4/ DIN 1048: Prüfverfahren für Beton. Teil 1. Beuth Verlag, Berlin (1978)
- /N5/ DIN 4030: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Teil 1 und 2. Beuth Verlag, Berlin (1991)
- /N6/ DIN 38414: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Teil 2. Beuth Verlag, Berlin (1985)

- /1/ Bamforth, P.B.: The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. Mag. Concr. Res., Bd. 39, S. 3-11 (1987)
- /2/ Bayer, E.; Kampen, R.; Klose, N.; Moritz, H.: Betonbauwerke in Abwasseranlagen. Herausgegeben vom Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln. Beton-Verlag, Düsseldorf, 3. Auflage (1995)
- /3/ Biczok, I.: Betonkorrosion, Betonschutz. Bauverlag, Wiesbaden, 5. Aufl. (1968)
- /4/ Brodersen, H.A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation, Aachen (1982)
- /5/ Bunte, D.: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Aussenbauteilen aus Stahlbeton. Dissertation TU Braunschweig (1993)
- /6/ Calleja, J.: Durability. Sub-Theme VII-2, 7th Int. Congr. Chem. Cem., Bd.1, Paris (1980)
- /7/ Dhir, R.K.; Hewlett, P.C.; Chan, Y.N.: Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. Magazine of Concrete Research, Bd. 39, S.183-195 (1987)
- /8/ Gräf, H.; Grube, H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. Beton, Bd. 36, S.184-187 und S.222-226 (1986)
- /9/ Kirstein, K.; Stiller, W.; Bock, E.: Mikrobielle Einflüsse auf Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau, Nr.8/86, S. 202-205 (1986)
- /10/ Kropp, J.; Hilsdorf, H.K. (ed.): Performance criteria for concrete durability. RILEM Report 12, E&FN Spon, London (1992)
- /11/ Mehta, P.K.: Influence of pozzolanic admixtures on the transition zone in concrete. Int. Sem. on some aspects of admixtures and industrial by-products on the durability of concrete, Session II, Göteborg (1986)

- /12/ Milde, K.; Sand, W.; Wolff, W.; Bock, E.: Thiobacilli of the corroded concrete walls of the Hamburg sewer system. *Journal of General Microbiology*, Bd. 129, S.1327-1333 (1983)
- /13/ Paulmann, K.: Ein Verfahren zur Messung und Beurteilung der Dichtigkeit von Betonoberflächen. In: Budelmann, H. (Hrg.): *Technologie und Anwendung der Baustoffe*, S.127-130. Festschrift F.S. Rostásy, Ernst und Sohn, Berlin (1992)
- /14/ Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Dichtigkeitsmessungen an Bauwerksbeton. *Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig* (1989)
- /15/ Rostásy, F.S.; Bunte, D.: Dauerhaftigkeit von Beton bei kombinierter physikalisch-chemischer Beanspruchung im Hinblick auf Verwitterungsprozesse. *Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig* (1989)
- /16/ Rostásy, F.S.; Schmidt-Döhl, F.: Chemischer Angriff auf Beton in einer Deponie-Sickerwasserkläranlage - Folgerungen für die Bauausführung. *Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig* (1996)
- /17/ Sand, W.; Ahlers, B.; Krause-Kupsch, T.; Meincke, M.; Krieg, E.; Diercks, M.; Sameluck, F.; Bock, E.: Mikroorganismen und ihre Bedeutung für die Zerstörung von mineralischen Baustoffen. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.* 3, S.36-40, ecomed Verlags GmbH Landsberg/München/Zürich (1989)
- /18/ Schießl, P.: Wirkung von Steinkohlenflugasche in Beton. *Beton*, Bd.40, S.519-523 (1990)
- /19/ Schlegel, H.G.: *Allgemeine Mikrobiologie*. Thieme Verlag, Stuttgart, 7. Aufl. (1992)
- /20/ Schmidt, F.: Dauerhafter Beton für Deponiebauwerke. Entwicklung und Erprobung verschiedener Rezepturen. In: Budelmann, H. (Hrg.): *Technologie und Anwendung der Baustoffe*, S.135-142. Festschrift F.S. Rostásy, Ernst und Sohn, Berlin (1992)
- /21/ Schmidt, F.; Rostásy, F.S.; Budelmann, H.: Entwicklung und Erprobung von Rezepturen für extrem dichten und dauerhaften Beton für Bauwerke für den Gewässerschutz. *Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig* (1992)
- /22/ Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. *Dissertation, TU München* (1991)
- /23/ Wagner, D.: Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung von korrosionsgefährdeten Betonoberflächen in Belebungsbecken. *Studienarbeit, durchgeführt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Baustoffkunde und Stahlbetonbau im Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie der Technischen Universität Braunschweig* (1993)
- /24/ Wagner, D.; Rinkel, U.: *Abschlußbericht zu den mikrobiologischen Untersuchungen von Betonproben aus dem Belebungsbecken der Kläranlage Braunschweig-Watenbüttel. Abschlußbericht des Institut für Mikrobiologie der Technischen Universität Braunschweig im Auftrag des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz* (1995)
- /25/ Watson, A.J.; Oyeka, C.C.: Oil permeability of hardened cement pastes and concrete. *Mag. Concr. Res.*, Bd. 33, S.85-95 (1981)
- /26/ Zagar, L.: Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, Bd. 26, S. 777-782 (1955)

FACHGEBIETE UND ABTEILUNGEN

